

ANÁLISE FENOMENOLÓGICA DA BIO-REMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS COM COMPOSTOS ORGÂNICOS – PERSPECTIVA MULTIDISCIPLINAR

MARIA MANUELA MARTINS DE CARVALHO

Mestre em Geologia de Engenharia pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

**Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Minas e Geo-Recursos**

Orientação

Professor Doutor António Manuel Antunes Fiúza

Co-Orientação

Professora Doutora Maria Teresa Pereira de Oliva Teles Moreira

Professora Doutora Maria Cristina da Costa Vila

JANEIRO DE 2014

Este trabalho foi realizado com apoio das seguintes instituições:

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

CIGAR – Centro de Investigação em Geo-Ambiente e Recursos.

REQUIMTE – Rede de Química e Tecnologia

IPP - Instituto Politécnico do Porto, ao abrigo do Programa de Formação Avançada de Docentes (IPP/P 058/2010).

ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto.

FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia, através do projecto PTDC/AAG-TEC/4403/2012.

Copyright © 2014 Maria Manuela Martins de Carvalho (mmc@isep.ipp.pt)

Reservados os direitos de publicação, tradução e adaptação.

Interdita a reprodução parcial ou integral sem prévia autorização da autora.

Texto escrito de acordo com a antiga ortografia.

Dedico este trabalho:

À memória dos meus pais, António Júlio e Maria Celeste e da minha avó Fernanda pelo seu imenso amor e exemplo de vida.

Aos meus filhos Luís e João porque são a minha Luz.

Ao Luiz porque ... bem sabes...nem sempre é fácil partilhar a vida!

AGRADECIMENTOS

Palmilhado este caminho, confesso que se tratou de um agradável percurso. Muito trabalho, algumas contrariedades e momentos menos bons, mas também, principalmente, muitos momentos gratificantes e construtivos. Ao longo de todo este tempo raramente me senti desanimada e só, devo esta felicidade a um conjunto de fantásticas pessoas que sempre me apoiaram e incentivaram. Desejo expressar a minha gratidão a todas as pessoas e entidades que das mais variadas formas me apoiaram e contribuíram para que fossem atingidos os objectivos propostos. Em particular, desejo agradecer:

Ao Professor Doutor António Fiúza, orientador deste trabalho, pelos ensinamentos e rigor científico, apoio, gentileza e amizade que tanto facilitaram a minha tarefa. Foi um enorme privilégio trabalhar consigo.

À Professora Doutora Cristina Vila, co-orientadora deste trabalho, pelos ensinamentos, pelo apoio diário, pela permanente disponibilidade, pela partilha e amizade. Tudo teria sido bem mais difícil sem a sua ajuda.

À Professora Doutora Teresa Oliva-Teles, co-orientadora deste trabalho, pelo apoio, disponibilidade e amizade. Nada seria igual sem a sua ajuda.

À Professora Doutora Cristina Delerue Matos pelo desafio, estímulo e amizade.

Ao Professor Doutor José Soeiro de Carvalho pela disponibilidade, estímulo e amizade.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Minas da FEUP pela sua gentileza, cuidado e apoio diário.

Aos meus colegas do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP por me terem apoiado e protegido neste período de tanto trabalho.

Ao CIGAR por disponibilizar as suas instalações e equipamentos e por todo o apoio concedido durante a execução deste trabalho.

Ao GRAQ pelo apoio e especialmente, à Mestre Paula Paíga pela preciosa ajuda na realização de alguns ensaios de caracterização dos solos.

Ao IPP pelo apoio concedido ao nível do Programa de Apoio à Formação Avançada de Docentes.

Ao ISEP por todo o apoio concedido durante este período.

Ao Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP por todo o apoio concedido durante este período.

Ao Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do CICCOPN, ao LNEG e ao Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho pela ajuda na realização dos ensaios de caracterização dos solos.

À Petrogal (Galp Energia), à CIMPOR de Souselas, à JMC – Investimentos Mobiliários, Lda. e à Soares da Costa Construções SGPS pelas facilidades concedidas na obtenção de amostras de solos.

À FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia, pelo financiamento de parte final do trabalho através do projecto PTDC/AAG-TEC/4403/2012.

Aos amigos que me aconselharam e apoiaram neste percurso: ao Tomás Albergaria que me iniciou e apoiou nestas andanças, à Valentina Domingues que me ajudou sempre que foi preciso, à Sílvia Spínola com quem partilho muita coisa, ao Adriano Teixeira por todo o apoio, à Elisabete Costa pelas ajudas e pelo carinho, ao José Hermenegildo Carvalho pelas ajudas e profícuas conversas e à Dr^a Maria Odília pelo apoio e enorme amizade. A vossa presença foi essencial.

Por último, mas não menos importante, à minha fantástica família: aos meus irmãos e irmã, às minhas cunhadas e cunhados, aos meus sogros, aos meus queridos sobrinhos e sobrinhas, ao Luiz, ao João e ao Luís. Por tudo!... Vocês são o meu ponto de apoio e equilíbrio,...o meu verdadeiro esteio. Não saberia viver sem vocês.

E porque, nestas alturas, sempre nos falta alguém muito importante, agradeço a todos os que de algum modo contribuíram para a concretização deste trabalho. **Muito Obrigada.**

RESUMO

O solo é um recurso natural precioso e não renovável à escala de tempo humana. Os solos sofrem diariamente pressões antropogénicas que condicionam drasticamente as suas aptidões, espoliando as gerações futuras do direito ao seu uso. O trabalho apresentado no presente documento integra uma crescente preocupação e investigação relativas às questões ambientais que comprometem e condicionam a preservação e o adequado uso dos solos.

Pretendeu-se com este trabalho avaliar o modo como os diferentes contaminantes utilizados entram em contacto com os diferentes tipos de solos, se distribuem pelas diferentes fases e a possibilidade de utilizar técnicas de bio-remediação para reabilitar os solos contaminados. O objectivo principal consistiu no estudo da possibilidade de utilizar bio-ventilação na reabilitação destes solos e monitorizar o processo com recurso a respirometria. Pretendeu-se ainda avaliar os modelos matemáticos, baseados na determinação das capacidades compartimentais dos compartimentos e sub-compartimentos ambientais, na simulação dos processos de reabilitação em estudo.

Para o efeito foram realizados, numa primeira fase, ensaios em meio líquido que permitiram desenvolver o consórcio microbiano e avaliar a sua capacidade em degradar os contaminantes. Posteriormente foram feitos ensaios em frasco que permitiram testar a capacidade de bio-remediação dos solos contaminados e otimizar os parâmetros de ensaio. Seguidamente avaliou-se o efeito de um aumento de escala no processo. Ainda nesta fase exploratória foram realizados ensaios que permitiram compreender e prever o modo como os contaminantes se distribuem pelas diferentes fases dos três solos naturais seleccionados (solo residual granítico, calcário margoso e xisto clorítico).

Terminada esta fase exploratória foram realizados ensaios de remediação de três tipos de solos contaminados com benzeno, tolueno, etilbenzeno, xileno e uma mistura dos quatro; foram testados métodos de bio-remediação assistida (bio-estimulação e bio-amplificação) com e sem ventilação.

O processo foi monitorizado com base na evolução temporal da concentração na fase gasosa e, no caso dos ensaios de bio-ventilação, foi também utilizada respirometria que permitiu avaliar a evolução temporal das concentrações de oxigénio e dióxido de carbono na fase gasosa.

Foram utilizados modelos matemáticos, baseados no cálculo das capacidades compartimentais dos compartimentos e dos sub-compartimentos ambientais (Modelos de Mackay), simulando os ensaios realizados. Por fim, os resultados teóricos e experimentais foram comparados e discutidos.

Os resultados obtidos permitiram verificar que os solos contaminados podem ser remediados quer por bio-remediação quer por bio-ventilação, sendo os tempos de remediação inferiores quando se utiliza bio-ventilação. Comprovou-se, ainda, que a composição mineralógica é um factor condicionante do tempo de remediação.

A análise respirométrica apresentou-se adequada ao controlo da actividade biológica, revelando potencialidades de utilização no controlo da bio-degradação.

Do estudo da distribuição dos contaminantes pelas diferentes fases dos solos concluiu-se que o calcário apresentou maior capacidade de adsorção do que o granito e o xisto. O modelo de adsorção de Freundlich foi, na maioria dos casos, mais adequado do que o de Langmuir.

Os modelos matemáticos utilizados revelaram-se capazes de prever o comportamento dos sistemas estudados e confirmaram os dados experimentais obtidos.

ABSTRACT

Soil is a precious natural resource not renewable on a human time scale. Soils withstand, on a daily basis, anthropogenic pressures that drastically influence their properties, spoiling the right to use it for future generations. The present work integrates the growing concern and investigation trends on issues relative to environmental questions that condition the correct use and preservation of soils.

This work intends to evaluate how several contaminants contact soils, spread through the different phases and assess the possibility of using bioremediation techniques to rehabilitate contaminated soils. The main goal was to study the possibility to use bioventilation on soil rehabilitation and to use respirometry to monitor the process. We also aimed at assessing the validity of the mathematical models based on the determination of environmental compartments capacity (Mackay approach) to simulate the rehabilitation processes under investigation.

The first part consisted in liquid phase tests to develop the microbial consortium and to evaluate its capacity to degrade the chosen contaminants. Later, batch tests allowed to test the capacity to bioremediate contaminated soils and to optimize the experimental parameters, followed by the evaluation of scaling up the process. Still in this exploratory part, tests were done to understand and predict how the contaminants will distribute among the soil phases.

After this exploratory phase, tests of soil remediation were conducted with soil samples contaminated with benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes and the mixture of these four compounds. Different methods of assisted bioremediation (biostimulation and bioaugmentation) were tested, with or without ventilation.

The process was monitored measuring the gaseous concentrations over time and in the case of bioventilation we also used respirometry to evaluate the oxygen and carbon dioxide concentrations over time.

Mathematical models based on Mackay approach were used to simulate the tests being carried out during this work. Finally, the theoretical and experimental results were compared and discussed.

The results revealed that the contaminated soil can be remedied either by bio-remediation or by bio-ventilation, but this last option with much faster rate. It was also verified that the mineralogical composition is a determinant factor for the remediation rate.

The respirometric analysis proved to be an adequate instrument for controlling the biological activity, revealing potential to be used in the control of full-scale biodegradation processes.

The study of the distribution of contaminants in the soils phases showed that limestone had higher adsorption capacity than granite or schist. The Freundlich adsorption model was, in most cases, more suitable than the Langmuir model.

The mathematical models used demonstrated capacity for predicting the behavior of the studied systems, evidencing a good agreement with the experimental data obtained.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Objectivos e Importância do Tema.....	3
1.2.	Organização do Trabalho.....	5
1.3.	O Solo.....	5
1.4.	Síntese da Geologia e Solos de Portugal	7
1.5.	A Contaminação de Solos.....	12
1.6.	Distribuição dos Contaminantes Pelas Fases Constituintes dos Solos.....	14
1.6.1.	Partição nas Fases Líquida e Gasosa	15
1.6.2.	Partição na Fase Sólida - Sorção.....	15
1.6.3.	Modelos Matemáticos Associados à Distribuição dos Contaminantes.....	18
1.6.3.1.	Isotérmicas de Adsorção	18
1.6.3.2.	Métodos de Análise das Isotérmicas de Adsorção	19
1.6.3.3.	Fugacidade.....	21
1.7.	Reabilitação de Solos Contaminados	23
1.7.1.	Tecnologias Físicas.....	26
1.7.2.	Tecnologias Químicas.....	26
1.7.3.	Tecnologias Biológicas.....	27
1.7.4.	Tecnologias Térmicas	30
1.8.	Respirometria	31
1.9.	Solos Seleccionados	32
1.10.	Contaminantes Seleccionados.....	33
1.10.1.	Benzeno	34
1.10.2.	Tolueno.....	36
1.10.3.	Etilbenzeno	38
1.10.4.	Xileno.....	39
1.11.	Tecnologias de Reabilitação de solos Seleccionadas	42
1.12.	Microrganismos Seleccionados.....	45
2.	MATERIAIS E MÉTODOS	47
2.1.	Materiais	49
2.1.1.	Reactores	49
2.1.2.	Reagentes	50
2.1.3.	Equipamentos.....	51
2.2.	Métodos.....	53

2.2.1.	Amostragem e Preparação de Solos	53
2.2.2.	Caracterização de Solos	55
2.2.3.	Quantificação dos Contaminantes na Fase Gasosa.....	58
2.2.4.	Quantificação do Oxigénio e do Dióxido de Carbono na Fase Gasosa.....	59
2.2.5.	Estudo da Distribuição dos Contaminantes	59
2.2.6.	Ensaio Exploratório de Bio-degradação em Meio Líquido	64
2.2.7.	Ensaio Exploratório de Bio-remediação de Solos	67
2.2.7.1.	Ensaio em Frasco de Solos Contaminados com Xileno	68
2.2.7.2.	Ensaio em Frasco de Solos Contaminados com Benzeno	70
2.2.7.3.	Ensaio em Coluna de Solos Contaminados com Xileno.....	70
2.2.7.4.	Ensaio em Coluna de Solos Contaminados com Benzeno.....	71
2.2.8.	Ensaio de Bio-remediação e de Bio-ventilação.....	72
2.2.9.	Metodologia de Interpretação dos Ensaio de Bio-remediação e de Bio-ventilação.....	77
3.	RESULTADOS	83
3.1.	Caracterização de Solos	85
3.1.1.	Solo Contaminado Utilizado Como Fonte de Inóculo (BSoil)	85
3.1.2.	Caracterização dos Solos Granítico, Calcário e Xistoso.....	87
3.1.2.1.	Caracterização Geológica	87
3.1.2.2.	Caracterização Geotécnica e Física	90
3.1.2.3.	Caracterização Química.....	93
3.1.2.4.	Quantificação da População Microbiana Autóctone	94
3.2.	Análise	95
3.2.1.	Cromatografia dos Contaminantes.....	95
3.2.2.	Respirometria (O ₂ e CO ₂).....	96
3.3.	Distribuição dos Contaminantes nos Solos.....	97
3.4.	Ensaio Exploratório.....	105
3.4.1.	Estudo de Bio-degradação em Meio Líquido	105
3.4.1.1.	Xileno.....	105
3.4.1.2.	Benzeno	108
3.4.2.	Estudo de Bio-remediação em Solos	111
3.4.2.1.	Ensaio de Bio-remediação em Frasco de Solos Contaminados com Xileno.....	111
3.4.2.2.	Ensaio de Bio-remediação em Frasco de Solos Contaminados com Benzeno.....	115
3.4.2.3.	Ensaio de Bio-remediação em Coluna de Solos Contaminados com Xileno.....	118
3.4.2.4.	Ensaio de Bio-remediação em Coluna de Solos Contaminados com Benzeno	122
3.5.	Ensaio de Bio-remediação e de Bio-ventilação.....	124
3.5.1.	Análise e Discussão de Dados Experimentais.....	124

3.5.1.1.	Ensaios Realizados em Calcário.....	124
3.5.1.2.	Ensaios Realizados em Granito	133
3.5.1.3.	Ensaios Realizados em Xisto	143
3.5.1.4.	Análise Global	151
3.5.2.	Aplicação de Modelos Baseados no Cálculo das Capacidades Compartimentais dos Compartimentos Ambientais	154
3.5.2.1.	Ensaios de Bio-remediação não Inoculados	154
3.5.2.2.	Ensaios de Bio-remediação Inoculados	158
3.5.2.3.	Ensaios de Bio-ventilação não Inoculados	164
3.5.2.4.	Ensaios de Bio-ventilação Inoculados.....	168
3.5.2.5.	Análise Global	177
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	179
4.1.	Conclusões.....	181
4.2.	Perspectivas Futuras.....	183
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	185
	ANEXO I - CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS.....	195
	ANEXO II – ANÁLISE CROMATOGRÁFICA - CALIBRAÇÃO	251
	ANEXO III - ISOTÉRMICAS	259
	ANEXO IV - ENSAIOS DE EXPLORATÓRIOS EM MEIO LÍQUIDO	269
	ANEXO V - ENSAIOS DE EXPLORATÓRIOS EM SOLO	275
	ANEXO VI - ENSAIOS DE BIO-REMEDIAÇÃO E DE BIO-VENTILAÇÃO – DADOS EXPERIMENTAIS	287
	ANEXO VII - ENSAIOS DE BIO-REMEDIAÇÃO E DE BIO-VENTILAÇÃO – MODELOS MATEMÁTICOS	309

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Unidades morfoestruturais da Península Ibérica (Dias et al., 2006).....	8
Figura 1.2 – Carta litológica simplificada de Portugal segundo o Atlas do Ambiente Digital (Ferreira, 2000).....	9
Figura 1.3 – Carta de solos de Portugal de acordo com a FAO segundo o Atlas do Ambiente Digital (Ferreira, 2000)	11
Figura 1.4 – Ponto da situação na Europa: (a) Actividades causadoras de contaminação. (b) Contaminantes que mais afectam os solos e as águas subterrâneas (EEA, 2009).....	12
Figura 1.5 – Distribuição dos contaminantes pelas diferentes fases do solo (Suthersan, 1997).	14
Figura 1.6 - Cobertura das superfícies minerais em função do teor em água. Adaptado de (Suthersan, 1997).....	17
Figura 1.7 – Isotérmicas de adsorção física segundo IUPAC (Ryu et al., 1999).....	18
Figura 1.8 - Tecnologias de reabilitação de solos. Adaptado de (Kuo, 1999).	25
Figura 1.9 – Ciclo de crescimento típico de uma população bacteriana em sistema fechado. Adaptado de (Eweis et al., 1999)	30
Figura 1.10 – Representação esquemática de um sistema típico de implementação <i>in situ</i> de bio-ventilação aeróbia. Adaptado de (Saling, 2007)	44
Figura 1.11 - Principais constituintes da gasolina, do jet-fuel e do gasóleo e os domínios de aplicação da extracção de vapor e da bio-ventilação (Downey et al., 2004).....	45
Figura 2.1 – Reactores utilizados. Frascos Erlenmeyer (a) fechados com Válvulas Mininert® (b) e colunas em aço inoxidável com quatro pontos de amostragem (c).....	49
Figura 2.2 – Equipamentos utilizados. (a) Cromatógrafo, (b) Respirómetro Sable, (c) Respirómetro Sensotec, (d) Respirómetro Servomex e (e) Controlador de caudal.	52
Figura 2.3 – Locais de colheita das amostras. BSoil – solo contaminado com crude (Leça da Palmeira - Porto); SR – solo residual granítico (Leça do Balio - Porto); CL – calcário margoso (Souselas - Coimbra) e XT – xisto clorítico (Folhadela – Vila Real).	54
Figura 2.4 – Ampola de vidro (a) e frascos Erlenmeyer (b) utilizados na preparação de padrões.	58
Figura 2.5 – Preparação dos vials para ensaio. (a): Provetes obtidos por quartilha manual, (b) Conjunto de vials, (c) Conjunto de frascos Erlenmeyer.....	61
Figura 2.6 – Esquema das culturas em meio líquido	64
Figura 2.7 – Culturas de enriquecimento. (a) Culturas em meio líquido; (b) Espalhamento em meio sólido.	65
Figura 2.8 – Ensaio em meio líquido. (a) Inóculo preparado com xileno; (b) Consórcio microbiano presente no inóculo.	67
Figura 2.9 – Ensaio de bio-remediação de solos contaminados com xileno realizados em frasco: (a) 1ª fase de ensaios em solo residual granítico a 20 e 26 °C. (b) 2ª fase de ensaios nos três tipos de subsolo em estudo: granítico, calcário e xistoso a 25 °C.....	68
Figura 2.10 – (a) Instalação dos ensaios de bio-remediação; (b) Instalação dos ensaios de bio-ventilação	74
Figura 3.1 - Visão macroscópica das amostras de BSoil (BSoil1 e BSoil2)	85
Figura 3.2 – Consórcio microbiano obtido a partir das amostras de BSoil (diluição de 10 ⁻³).	86
Figura 3.3 – Quantificação da população microbiana autóctone de BSoil.	86
Figura 3.4 – Localização da amostragem de solo residual granítico (SR) num excerto da Carta Geológica de Portugal à escala 1/200000 – Folha 1 (Pereira et al., 1992).	87

Figura 3.5 - Localização da amostragem de subsolo calcário (CL) num extracto da Carta Geológica de Portugal à escala 1/500000 (Oliveira et al., 1992).....	88
Figura 3.6 - Localização da amostragem de subsolo xistoso (XT) num excerto da Carta Geológica de Portugal à escala 1/200000 – Folha 2 (Ribeiro et al., 2006).	89
Figura 3.7 - Visão macroscópica das amostras de solo residual granítico (SR), solo de calcário margoso (CL) e solo de xisto clorítico (XT).....	89
Figura 3.8 – Curvas granulométricas dos solos em estudo.....	90
Figura 3.9 – (a): Representação do solo granítico (SR) e do calcário (CL) na Carta de Plasticidade de Casagrande. (b): Representação do solo granítico (SR), do calcário (CL) e do xisto XT) no Triângulo de Feret.....	91
Figura 3.10 – Quantificação da população microbiana autóctone nos três solos em estudo: granito (SR), calcário (CL) e xisto (XT).	95
Figura 3.11 - Evolução da distribuição dos contaminantes:benzeno (B), tolueno (T), etilbenzeno (E), xileno (X) e mistura de benzeno, tolueno, etilbenzeno e o-xileno (BTEoX)) na fase gasosa dos solos estudados em função da massa de contaminante adicionada ao sistema: (a) Calcário; (b) Granito; (c) Xisto.....	98
Figura 3.12 - Evolução da distribuição dos contaminantes (benzeno (B), tolueno (T), etilbenzeno (E), xileno (X) e mistura de benzeno, tolueno, etilbenzeno e o-xileno (BTEoX)) na fase sólida dos solos estudados em função da massa de contaminante adicionada ao sistema: (a) Calcário; (b) Granito; (c) Xisto.	99
Figura 3.13 - Evolução da distribuição dos contaminantes (benzeno (B), tolueno (T), etilbenzeno (E), xileno (X) e mistura de benzeno, tolueno, etilbenzeno e o-xileno (BTEoX)) na fase aquosa dos solos estudados em função da massa de contaminante adicionada ao sistema: (a) Calcário; (b) Granito; (c) Xisto.....	100
Figura 3.14 – Isotérmicas de equilíbrio em calcário (CL), granito (SR) e xisto (XT). (a) Benzeno (B), (b) Tolueno (T), (c) Etilbenzeno (E), (d) Xileno (X) (e) Mistura de benzeno, tolueno, etilbenzeno e o-xileno (BTEoX).....	102
Figura 3.15 – Bio-degradação de xileno em meio líquido: (a) Evolução da concentração de xileno na fase gasosa. (b) Tempo necessário para atingir concentração na fase gasosa inferior a 0,5 mg L ⁻¹ . (c) Quantificação da biomassa no final dos ensaios.	106
Figura 3.16 – Bio-degradação do xileno para os níveis de contaminação seleccionados (138, 172 e 206 mg L ⁻¹): (a) Evolução da concentração de xileno na fase gasosa. (b) Tempo necessário para atingir a concentração residual. (c) Quantificação da biomassa no final dos ensaios.	107
Figura 3.17 – Bio-degradação do benzeno em meio líquido: (a) Evolução da concentração de benzeno na fase gasosa. (b) Tempo necessário para atingir a concentração residual. (c) Quantificação da biomassa no final dos ensaios.....	109
Figura 3.18 – Bio-degradação do benzeno em meio líquido para os níveis de contaminação seleccionados (180, 210 e 280 mg L ⁻¹): (a) Evolução da concentração de benzeno na fase gasosa. (b) Tempo necessário para atingir a concentração residual. (c) Quantificação da biomassa no final dos ensaios.	110
Figura 3.19 – Evolução da concentração de xileno na fase gasosa nos ensaios de bio-remediação realizados em frasco, em solo residual granítico a 20°C (a) e a 26°C (b) com níveis de contaminação de 70, 86 e 103 mg kg ⁻¹ . Linhas contínuas representam ensaios de branco.....	112
Figura 3.20 - Quantificação da biomassa no final dos ensaios de bio-remediação, em frasco, de solo residual granítico contaminado com xileno (70, 86 e 103 mg kg ⁻¹), com temperaturas de ensaio de 20 e 26 °C.....	113
Figura 3.21 - Evolução da concentração de xileno na fase gasosa nos ensaios de bio-remediação realizados, em frasco a 25°C, com contaminação de 103 mg kg ⁻¹ , em solo xistoso (verde), solo residual granítico (laranja) e solo calcário (azul). Linhas contínuas representam ensaios de branco e linhas contínuas com asterisco representam ensaios brancos estéreis.	113

Figura 3.22 - Quantificação da biomassa no final dos ensaios de bio-remediação realizados, em frasco a 25°C, com contaminação de 103 mg kg ⁻¹ , em solo xistoso, solo residual granítico e solo calcário.....	114
Figura 3.23 - Eficiência teórica da bio-remediação dos solos contaminados com xileno, determinada no final dos ensaios inoculados, em solo xistoso, solo residual granítico e solo calcário.	115
Figura 3.24 – Evolução da concentração de benzeno na fase gasosa nos ensaios de bio-remediação em solo residual granítico realizados em frasco a 25°C, com níveis de contaminação de 88, 105 e 140 mg kg ⁻¹	116
Figura 3.25 – Ensaios de bio-remediação realizados, em frasco a 25°C, com níveis de contaminação de 88, 105 e 140 mg kg ⁻¹ , em solo residual granítico contaminado com benzeno: (a) Quantificação da biomassa no final dos ensaios de bio-remediação de solo residual granítico contaminado com benzeno. (b) Eficiência teórica da bio-remediação de solo granítico contaminado com benzeno, determinada no final dos ensaios inoculados.....	117
Figura 3.26 – Ensaios de bio-remediação realizados em coluna a 25°C, em solo residual granítico contaminado com xileno (103 mg kg ⁻¹): (a) Evolução da concentração de xileno na fase gasosa;	118
Figura 3.27 – Ensaios de bio-remediação realizados em coluna a 25°C, em solo residual granítico contaminado com xileno (155 mg kg ⁻¹): (a) Evolução da concentração de xileno na fase gasosa;	119
Figura 3.28 – Evolução da concentração de xileno na fase gasosa nos ensaios de bio-remediação realizados em coluna a 25°C, em solo xistoso (verde), solo residual granítico (laranja) e solo calcário (azul), com nível de contaminação de 155 mg kg ⁻¹	120
Figura 3.29 – Quantificação da biomassa no final dos ensaios de bio-remediação realizados, em coluna a 25 °C, em solo xistoso, solo residual granítico e solo calcário, com nível de contaminação de 155 mg kg ⁻¹	121
Figura 3.30 – Eficiência teórica da bio-remediação dos ensaios realizados em coluna, a 25 °C, em (a) solo residual granítico com nível de contaminação de 103 mg kg ⁻¹ ; (b) em solo xistoso, solo residual granítico e solo calcário com nível de contaminação de 155 mg kg ⁻¹	122
Figura 3.31 – Evolução da concentração de benzeno na fase gasosa nos ensaios de bio-remediação realizados, em coluna a 25°C, em solo residual granítico, com nível de contaminação de 140 mg kg ⁻¹ . Linhas contínuas representam ensaios de branco.....	123
Figura 3.32 – Ensaios de bio-remediação realizados em solo residual granítico contaminado com benzeno (140 mg kg ⁻¹), em coluna a 25°C (a) Eficiência teórica no final dos ensaios; (b) Quantificação da biomassa no final dos ensaios.	123
Figura 3.33 – Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em calcário (CL) contaminado com 200 mg kg ⁻¹ de benzeno (B). (a) Evolução da concentração de benzeno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O ₂ e CO ₂ na fase gasosa.	126
Figura 3.34 – Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em calcário (CL) contaminado com 200 mg kg ⁻¹ de tolueno (T). (a) Evolução da concentração de tolueno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O ₂ e CO ₂ na fase gasosa.	127
Figura 3.35 – Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em calcário (CL) contaminado com 200 mg kg ⁻¹ de etilbenzeno (E). (a) Evolução da concentração de etilbenzeno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O ₂ e CO ₂ na fase gasosa.	129
Figura 3.36 – Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em calcário (CL) contaminado com 200 mg kg ⁻¹ de xileno (X). (a) Evolução da concentração de xileno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O ₂ e CO ₂ na fase gasosa.	130
Figura 3.37 – Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em calcário (CL) contaminado com 200 mg kg ⁻¹ da mistura BTEoX. (a) Evolução da concentração de BTEoX na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O ₂ e CO ₂ na fase gasosa.	131
Figura 3.38 – Ensaios de remediação (B, BV, Bb e BVb) realizados em calcário (CL) contaminado com benzeno (B) tolueno (T), etilbenzeno (E), xileno (X) e BTEoX. (a)	

Quantificação da biomassa no final dos ensaios; (b) Eficiência teórica determinada após 7 dias de ensaio, após 10 dias de ensaio e no final dos ensaios com respectivo tempo de remediação. ...	132
Figura 3.39 – Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em granito (SR) contaminado com 200 mg kg ⁻¹ de benzeno (B). (a) Evolução da concentração de benzeno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O ₂ e CO ₂ na fase gasosa.	135
Figura 3.40 – Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em granito (SR) contaminado com 200 mg kg ⁻¹ de tolueno (T). (a) Evolução da concentração de tolueno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O ₂ e CO ₂ na fase gasosa.	136
Figura 3.41 – Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em granito (SR) contaminado com 200 mg kg ⁻¹ de etilbenzeno (E). (a) Evolução da concentração de etilbenzeno na fase gasosa;	138
Figura 3.42 – Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em granito (SR) contaminado com 200 mg kg ⁻¹ de xileno (X). (a) Evolução da concentração de xileno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O ₂ e CO ₂ na fase gasosa.	139
Figura 3.43 – Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em granito (SR) contaminado com 200 mg kg ⁻¹ da mistura BTEoX. (a) Evolução da concentração de BTEoX na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O ₂ e CO ₂ na fase gasosa.	140
Figura 3.44 – Ensaios de remediação (B, BV, Bb e BVb) realizados em granito (SR) contaminado com benzeno (B) tolueno (T), etilbenzeno (E), xileno (X) e BTEoX. (a) Quantificação da biomassa no final dos ensaios; (b) Eficiência teórica determinada após 7 dias de ensaio, após 14 dias de ensaio e no final dos ensaios com respectivo tempo de remediação. ...	141
Figura 3.45 – Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em xisto (XT) contaminado com 200 mg kg ⁻¹ de benzeno (B). (a) Evolução da concentração de benzeno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O ₂ e CO ₂ na fase gasosa.	144
Figura 3.46 - Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em xisto (XT) contaminado com 200 mg kg ⁻¹ de tolueno (T). (a) Evolução da concentração de tolueno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O ₂ e CO ₂ na fase gasosa.	145
Figura 3.47 – Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em xisto (XT) contaminado com 200 mg kg ⁻¹ de etilbenzeno (E). (a) Evolução da concentração de etilbenzeno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O ₂ e CO ₂ na fase gasosa.	146
Figura 3.48 – Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em xisto (XT) contaminado com 200 mg kg ⁻¹ de xileno (X). (a) Evolução da concentração de xileno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O ₂ e CO ₂ na fase gasosa.	148
Figura 3.49 – Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em xisto (XT) contaminado com 200 mg kg ⁻¹ da mistura BTEoX. (a) Evolução da concentração de BTEoX na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O ₂ e CO ₂ na fase gasosa.	149
Figura 3.50 – Ensaios de remediação (B, BV, Bb e BVb) realizados em xisto (XT) contaminado com benzeno (B) tolueno (T), etilbenzeno (E), xileno (X) e BTEoX. (a) Quantificação da biomassa no final dos ensaios; (b) Eficiência teórica determinada após 7 dias de ensaio e no final dos ensaios com respectivo tempo de remediação.	150
Figura 3.51 – Ensaios de bio-remediação não inoculados realizados em calcário. Comparação entre as concentrações finais de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente e as calculadas com base nas capacidades compartimentais e respectivo erro relativo.	155
Figura 3.52 – Ensaios de bio-remediação não inoculados realizados em granito. Comparação entre as concentrações finais de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente e as calculadas com base nas capacidades compartimentais e respectivo erro relativo.	156
Figura 3.53 – Ensaios de bio-remediação não inoculados realizados em xisto. Comparação entre as concentrações finais de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente e as calculadas com base nas capacidades compartimentais e respectivo erro relativo.	157
Figura 3.54 – Ensaios de bio-remediação realizados em calcário inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas	

com base nas capacidades compartimentais: (a) Benzeno; (b) Tolueno; (c) Etilbenzeno; (d) Xileno; (e) BTEoX.....	159
Figura 3.55 – Ensaios de bio-remediação realizados em granito inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: Benzeno, ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b); Tolueno, ensaio 1 (c) e ensaio 2 (d); Etilbenzeno, ensaio 1 (e) e ensaio 2 (f).	160
Figura 3.56 – Ensaios de bio-remediação realizados em granito inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: Xileno, ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b) e BTEoX (c).	161
Figura 3.57 – Ensaios de bio-remediação realizados em xisto inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: (a) Benzeno; (b) Tolueno; (c) Etilbenzeno; (d) Xileno; (e) BTEoX.....	162
Figura 3.58 – Ensaios de bio-ventilação realizados em calcário não inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: (a) Benzeno; (b) Tolueno; (c) Etilbenzeno; (d) Xileno; (e) BTEoX.....	165
Figura 3.59 – Ensaios de bio-ventilação realizados em granito não inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: (a) Benzeno; (b) Tolueno; (c) Etilbenzeno; (d) Xileno; (e) BTEoX.....	166
Figura 3.60 – Ensaios de bio-ventilação realizados em xisto não inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: (a) Benzeno; (b) Tolueno; (c) Etilbenzeno; (d) Xileno; (e) BTEoX.....	167
Figura 3.61 – Ensaios de bio-ventilação realizados em calcário inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: (a) Benzeno; (b) Tolueno; (c) Etilbenzeno; (d) Xileno; (e) BTEoX.....	170
Figura 3.62 – Ensaios de bio-ventilação realizados em granito inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: Benzeno, ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b); Tolueno, ensaio 1 (c) e ensaio 2 (d); Etilbenzeno, ensaio 1 (e) e ensaio 2 (f).	171
Figura 3.63 – Ensaios de bio-ventilação realizados em granito inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: Xileno, ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b); BTEoX (c).	172
Figura 3.64 – Ensaios de bio-ventilação realizados em xisto inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: (a) Benzeno; (b) Tolueno; (c) Etilbenzeno; (d) Xileno; (e) BTEoX.....	173

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Condições ótimas para bio-degradação para a maioria dos microrganismos (Kuo, 1999)	29
Tabela 1.2 - Propriedades físicas e químicas do benzeno (ATSDR, 2007a; Morgan et al., 2009a; Suthersan et al., 2005)	34
Tabela 1.3 – Efeitos do benzeno na saúde do Homem e dos Animais (ATSDR, 2007a)	35
Tabela 1.4 – Valor guia para o benzeno (Jeffries et al., 2009; Morgan et al., 2009a)	35
Tabela 1.5 - Propriedades físicas e químicas do tolueno (ATSDR, 2000; Róisin De Búrca et al., 2009; Suthersan et al., 2005)	36
Tabela 1.6 – Efeitos do tolueno na saúde do Homem e dos Animais (ATSDR, 2000)	37
Tabela 1.7 – Valor guia para o tolueno (Jeffries et al., 2009; Róisin De Búrca et al., 2009)	37
Tabela 1.8 - Propriedades físicas e químicas do etilbenzeno (ATSDR, 2010; Morgan et al., 2009b; Suthersan et al., 2005)	38
Tabela 1.9 – Efeitos do etilbenzeno na saúde do Homem e dos Animais (ATSDR, 2010)	39
Tabela 1.10 – Valor guia para o etilbenzeno (Jeffries et al., 2009; Morgan et al., 2009b)	39
Tabela 1.11 - Propriedades físicas e químicas do xileno (ATSDR, 2007b; Morgan et al., 2009c)	40
Tabela 1.12 – Efeitos do xileno na saúde do Homem e dos Animais (ATSDR, 2007b)	41
Tabela 1.13 – Valor guia para o xileno (Jeffries et al., 2009; Morgan et al., 2009c)	41
Tabela 2.1 – Equipamentos utilizados no decurso dos trabalhos	51
Tabela 2.2 – Localização e colheita das amostras de solo	54
Tabela 2.3 – Níveis de contaminação utilizados nas isotérmicas	62
Tabela 2.4 – Níveis de contaminação utilizados nos ensaios em meio líquido	66
Tabela 2.5 – Síntese dos ensaios realizados em meio líquido	66
Tabela 2.6 - Síntese dos ensaios exploratórios de bio-remediação de solos contaminados com xileno realizados em frasco	69
Tabela 2.7 - Síntese dos ensaios exploratórios de bio-remediação de solo granítico (SR) contaminado com benzeno realizados em frasco	70
Tabela 2.8 - Síntese dos ensaios exploratórios de bio-remediação de solos contaminados com xileno realizados em coluna.	71
Tabela 2.9 - Síntese dos ensaios exploratórios de bio-remediação de solo granítico (SR) contaminado com benzeno realizados em coluna.	72
Tabela 2.10 - Síntese dos ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação realizados em calcário.	75

Tabela 2.11 - Síntese dos ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação realizados em granito.....	76
Tabela 2.12 - Síntese dos ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação realizados em xisto.	77
Tabela 3.1 – Propriedades dos solos contaminados com crude (BSoil).	85
Tabela 3.2 – Caracterização geotécnica dos solos granítico (SR), calcário (CL) e xisto (XT).....	91
Tabela 3.3 - Classificação dos Solos segundo a Norma ASTM D2487-85	92
Tabela 3.4 - Caracterização física dos solos SR, CL e XT.....	92
Tabela 3.5 – Análise de compostos inorgânicos maioritários no granito (SR), no calcário (CL) e no xisto (XT)	93
Tabela 3.6 – Caracterização Química de SR, CL e XT.	94
Tabela 3.7 - Resumo dos parâmetros relativos às rectas de calibração (isotérmica a 200 °C) traçadas para a quantificação individual dos contaminantes.....	96
Tabela 3.8 - Resumo dos parâmetros relativos às rectas de calibração (isotérmica a 40 °C) traçadas para a quantificação da mistura de contaminantes.....	96
Tabela 3.9 - Resultados obtidos no ajuste dos valores experimentais aos modelos de Freundlich e de Langmuir em calcário, granito e xisto.	103
Tabela 3.10 – Avaliação da cinética dos ensaios inoculados realizados em calcário.....	133
Tabela 3.11 – Avaliação da cinética dos ensaios inoculados realizados em granito.	142
Tabela 3.12 – Avaliação da cinética dos ensaios inoculados realizados em xisto.....	151
Tabela 3.13 – Síntese dos resultados obtidos nos ajustes dos modelos baseados na capacidade compartimental dos compartimentos ambientais aplicados aos ensaios de bio-remediação inoculados.	163
Tabela 3.14 – Síntese dos resultados obtidos nos ajustes dos modelos baseados na capacidade compartimental dos compartimentos ambientais aplicados aos ensaios de bio-ventilação não inoculados	168
Tabela 3.15 – Síntese dos resultados obtidos nos ajustes dos modelos baseados na capacidade compartimental dos compartimentos ambientais aplicados aos ensaios de bio-ventilação inoculados	174
Tabela 3.16 – Síntese dos resultados obtidos na interpretação dos resultados experimentais da respirometria nos ensaios de bio-ventilação inoculados realizados em calcário	175
Tabela 3.17 – Síntese dos resultados obtidos na interpretação dos resultados experimentais da respirometria nos ensaios de bio-ventilação inoculados realizados em granito.....	176
Tabela 3.18 – Síntese dos resultados obtidos na interpretação dos resultados experimentais da respirometria nos ensaios de bio-ventilação inoculados realizados em xisto	176

ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS:

A – área da base da coluna

A_t – actividade das argilas

AR - argila

ASTDR – United States Department of Health and Human Services

b – parâmetro do modelo de Langmuir relacionado com a entalpia de adsorção, capacidade máxima de adsorção

B – benzeno

BbCL - ensaios de bio-remediação não inoculados de calcário esterilizado

BbSR - ensaios de bio-remediação não inoculados de granito esterilizado

BbXT - ensaios de bio-remediação não inoculados de xisto esterilizado

BCL – ensaios de bio-remediação de calcário

BSR – ensaios de bio-remediação de granito

BTEX – benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno

BTEoX – benzeno, tolueno, etilbenzeno e orto-xileno

BSoil – solo contaminado com crude

BXT – ensaios de bio-remediação de xisto

BVbCL - ensaios de bio-ventilação não inoculados de calcário esterilizado

BVbSR - ensaios de bio-ventilação não inoculados de granito esterilizado

BVbXT - ensaios de bio-ventilação não inoculados de xisto esterilizado

BVCL – ensaios de bio-ventilação de calcário

BVSR – ensaios de bio-ventilação de granito

BVXT – ensaios de bio-ventilação de xisto

BZ – benzeno nos ensaios exploratórios

C_{aq} – concentração de contaminante na fase aquosa

C_c – coeficiente de curvatura

C_{eq} – concentração no equilíbrio na fase fluida

C_{gas} – concentração de contaminante na fase gasosa

C_{gi} – concentração de contaminante na fase gasosa no instante de tempo i

C_i – concentração no instante de tempo i

C_{mm} – concentração de contaminante na matéria mineral activa

C_{mm_i} – concentração de contaminante na matéria mineral activa no instante de tempo i

C_{mo} - concentração de contaminante na matéria orgânica

C_{mo_i} – concentração de contaminante na matéria orgânica no instante de tempo i

C_p – concentração de contaminante nos padrões

C_s – concentração no solo

C_{soil} – concentração de contaminante na fase sólida

C_u – coeficiente de uniformidade

C_w – concentração de contaminante na água

C_{w_i} – concentração de contaminante na água no instante de tempo i

C – ensaios exploratórios de bio-remediação realizados em coluna de aço inoxidável

CB – ensaios exploratórios não inoculados realizados em coluna de aço inoxidável

CBE – ensaios exploratórios não inoculados, em solos esterilizados, realizados em coluna de aço inoxidável

CFU – unidades formadoras de colónias

CL – calcário margoso

CO – carbono orgânico

D_{10} – percentil 10 da distribuição granulométrica

D_{30} - percentil 30 da distribuição granulométrica

D_{50} - mediana da distribuição granulométrica

D_{60} - percentil 60 da distribuição granulométrica

$D_{máx}$ – dimensão máxima do solo

D_r – desaparecimento por reacção

η – porosidade

E - etilbenzeno

E_f – eficiência teórica da remediação

EBC – European Chemicals Bureau

EC – cultura de enriquecimento em meio líquido

EEA – Environmental European Agency

$EPA / USEPA$ – United States Environmental Protection Agency

ERH – aquecimento por resistências eléctricas (electrical resistance heating)

EUA – Estados Unidos da América (United States of America)

EVO – emulsified vegetable oil

f – fugacidade

f_0 – fugacidade inicial

f_i – fugacidade no instante de tempo i

f_{co} – fracção de carbono orgânico

F – ensaios exploratórios de bio-remediação realizados em frasco

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

FB – ensaios exploratórios não inoculados realizados em frasco

FBE – ensaios exploratórios não inoculados, em solos esterilizados, realizados em frasco

FID – detector de ionização em chama (flame ionisation detector)

G – densidade das partículas

γ'_3 - Granito do Porto

h – altura da coluna

H – constante de Henry

Hv – humidade volumétrica

IC – carbono inorgânico

IP – índice de plasticidade

IRA – aquecimento por radiofrequência (radio frequency heating)

ISTD – dessorção térmica *in situ* (*in situ* thermal desorption/conductive heating)

IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry

J_g^1 – série de margas e calcários margosos tenros

k – coeficiente de permeabilidade

K – coeficiente de absorção do composto

K_c – constante cinética

K_{co} – coeficiente de partilha do carbono orgânico

K_F – constante do modelo de Freundlich

K_L – constante do modelo de Langmuir

K_{mm} – coeficiente de partilha matéria mineral activa - água

K_{mo} – coeficiente de partilha matéria orgânica - água

K_{ow} – coeficiente de partilha octanol – água

K_p – coeficiente de partilha

K_s – coeficiente de partilha solo – água

LB – meio sólido Lysogeny

LL – limite de liquidez

LOD – limite de detecção

LOQ – limite de quantificação

LP – limite de plasticidade

M_0 – massa inicial de contaminante

M_{aq} – massa de contaminante na fase aquosa

M_{gas} – massa de contaminante na fase gasosa

M_i – massa de contaminante no instante de tempo i

M_s – massa de contaminante na fase sólida

M_t – massa total de contaminante

M_{soil} – massa total de solo seco

MMA – meio mineral líquido

mo – matéria orgânica

n - expoente da equação do modelo de Freundlich relacionado com o calor de adsorção intrínseco do vapor ou do soluto

N_t – porosidade volumétrica total

NAPL – fase líquida não aquosa

NLLS – regressão não linear de mínimos quadrados (non linear least squares)

NVOCs – compostos orgânicos não voláteis

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

PAHs – hidrocarbonetos aromáticos policíclicos

P_i – porta de amostragem de ordem i nas colunas de aço inoxidável

q – massa de adsorvato por unidade de massa de adsorvente

R – constante dos gases perfeitos

ρ – massa volúmica do solo seco

ρ' – massa volúmica do solo húmido

ρ_{mm} – massa volúmica da matéria mineral activa

ρ_{mo} – massa volúmica da matéria orgânica

ρ_s – massa volúmica dos sólidos

ρ_c – massa volúmica do contaminante

S_b – solubilidade

SEE – steam enhanced extraction

SR – solo residual granítico

STAR – sustaining treatment for active remediation

SVE – Extração de vapor (soil vapor extraction)

SVOCs – compostos orgânicos semivoláteis não halogenados

SV – tempo de semi-vida

t – tempo

t_i – tempo de estabilização

t_{ret} – tempo de retenção

T – tolueno

T_i – transferência de ordem i (ensaio em meio líquido)

TC – carbono total

TOC – carbono orgânico total

TPH – hidrocarbonetos petrolíferos totais

W – teor em água

W_s – teor em água de saturação

W_{se} - teor em água de saturação determinado experimentalmente

W_{st} - teor em água de saturação calculado

WHO – World Health Organization

UK – Reino Unido (United Kingdom)

USDA – United States Department of Agriculture

VOCs – compostos orgânicos voláteis não halogenados

V_{aq} – volume da fase aquosa

V_c – volume de contaminante

V_{gas} – volume da fase gasosa

V_{mm} – volume da matéria mineral activa

V_{mo} – volume da matéria orgânica

V_p – pressão de vapor

V_r – volume do recipiente

V_s – volume de solo seco

V_t – volume de solo a granel

V_w – volume de água

X – xileno

XL – xileno nos ensaios exploratórios

X-SVOCs – compostos orgânicos semivoláteis halogenados

XT – xisto clorítico

X-VOCs – compostos orgânicos voláteis halogenados

Z - capacidade compartimental do compartimento ambiental

Z_g – capacidade compartimental do ar / fase gasosa

Z_s – capacidade compartimental dos sólidos

Z_{mm} – capacidade compartimental da matéria mineral activa

Z_{mo} – capacidade compartimental da matéria orgânica

Z_o – capacidade compartimental do octanol

Z_{TP} – total ponderal das capacidades compartimentais

Z_w – capacidade compartimental da água

1.INTRODUÇÃO

1.1. OBJECTIVOS E IMPORTÂNCIA DO TEMA

A investigação conducente à realização desta tese de doutoramento pretendeu abordar a problemática da bio-remediação de subsolos naturais contaminados com compostos orgânicos, com enfoque na bio-ventilação. O objectivo principal foi o estudo detalhado da fenomenologia e cinética da degradação, por bio-ventilação, de compostos orgânicos constituintes de combustíveis, utilizando uma abordagem multidisciplinar que incorpora simultaneamente os aspectos físicos e biológicos da tecnologia.

A bio-ventilação é uma tecnologia de tratamento de compostos orgânicos degradáveis aerobicamente quando existentes na zona de infiltração do solo, sendo o fornecimento de oxigénio garantido por circulação de ar através do subsolo. Nesta tecnologia, os contaminantes são preferencialmente bio-degradados e não volatilizados, apresentando um campo de aplicação muito mais amplo que a extracção de vapor (SVE – soil vapor extraction), onde a volatilização é o mecanismo preferencial. A bio-ventilação é uma tecnologia de bio-remediação complexa mas muito utilizada em todo o mundo.

Quando se induz uma corrente de ar através de um solo contaminado com hidrocarbonetos ocorre simultaneamente a sua volatilização e a sua bio-degradação. A amplitude de cada um destes fenómenos depende das condições operatórias, das propriedades dos contaminantes e das características do solo. A investigação feita até ao presente, bem como os modelos conceptuais, abordam separadamente as duas vertentes: volatilização e bio-degradação; a investigação fundamental e pluridisciplinar, englobando a totalidade dos factores referidos e suas interacções, ainda apresenta uma forte lacuna de conhecimento. A volatilização é normalmente estudada utilizando modelos físicos uni, bi ou tridimensionais de circulação de ar através do solo; parte-se de uma repartição multifásica inicial do contaminante no solo, considerado em equilíbrio e aplica-se um gradiente de pressão que induz a circulação e a transferência do contaminante da fase sólida para a líquida e desta para a gasosa. A bio-degradação é quase sempre considerada autonomamente utilizando os clássicos modelos cinéticos de Monod e/ou Michaëlis - Menten.

J. Møller et al. estudaram a bio-ventilação de solos contaminados com compostos do gasóleo, comparando as cinéticas da degradação com base nas concentrações de óleos no solo e nos dados respirométricos (Møller et al., 1996), a volatilização era insignificante atendendo aos tipos de contaminantes escolhidos e os dados obtidos não permitiram a construção de nenhum modelo cinético conceptual. J. Bachman et al. estudaram a bio-ventilação em escala laboratorial com base nas concentrações da fase gasosa (Bachman et al., 2001). T.J. Aspray et al. aplicaram métodos respirométricos discretos na monitorização da bio-reabilitação *in situ* de lamas (Aspray et al., 2007). Sayles et al. estudaram, à escala piloto, a bio-ventilação de hidrocarbonetos não constituintes de combustíveis (Sayles et al., 1997). Magalhães et al. estudaram o regime de transição entre a bio-ventilação e a extracção de vapor utilizando também tecnologias que usam filtros de *biotrickling* (Magalhães et al., 2009). Em relação à modelização as primeiras abordagens sistemáticas foram feitas por Robert Hinchee entre 1991

e 1994 (Hinchee, 1994). Esta abordagem foi posteriormente desenvolvida por Rodriguez-Maroto e Cesar Gómez-Lahoz da Universidade de Málaga (Gómez-Lahoz et al., 1994). Posteriormente, Rathfelder et al. desenvolveram um outro modelo baseado no MISER - Michigan Soil Vapor Extraction Remediation Model (Rathfelder et al., 2000). Em 2004, Schwartz et al. desenvolveram um modelo que é uma descrição razoável do campo de fluxos do ar pressurizado entre os furos de injeção e de extracção numa unidade de bio-reabilitação (Schwarze et al., 2004).

Não existem publicadas na literatura abordagens multidisciplinares integradas. A investigação realizada no âmbito deste trabalho considerou simultaneamente os vários fenómenos relevantes: a circulação de ar no solo e o seu efeito na volatilização de compostos orgânicos com propriedades químicas diferentes, o efeito do oxigénio transportado nas reacções redox da bio-degradação, a cinética das populações microbianas, a cinética da volatilização e da degradação, a produção de dióxido de carbono, o consumo de oxigénio e a evolução temporal da taxa global de reabilitação. A informação obtida no trabalho experimental foi interpretada com recurso a modelos quantitativos, inicialmente por modelos parciais que consideraram um só tipo de fenómeno e posteriormente por um modelo global no qual se integraram as componentes relevantes do sistema: características do solo, condições de operação e um modelo da volatilização e bio-degradação.

Os trabalhos realizados tiveram como objectivos:

- ✓ estudar a distribuição trifásica (fase sólida, líquida e vapor) dos BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno), separadamente e em conjunto, para estado estacionário dos solos contaminados;
- ✓ estudar a cinética de reabilitação dos solos contaminados com BTEX tendo em conta as características físicas e biológicas;
- ✓ aplicar e adaptar métodos para extrair e desenvolver culturas de microrganismos existentes na natureza com capacidade para degradarem os BTEX;
- ✓ avaliar a capacidade degradadora das culturas desenvolvidas em solos inertes contaminados;
- ✓ analisar e interpretar as componentes respirométricas da bio-degradação;
- ✓ desenvolver e aplicar modelos matemáticos parciais para a volatilização e para a bio-degradação;
- ✓ desenvolver e aplicar um modelo conceptual multidisciplinar, integrador das principais variáveis envolvidas nos processos.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se organizado em quatro capítulos, bibliografia e anexos. No presente capítulo (Capítulo 1) faz-se uma introdução ao tema, explica-se a sua importância e aborda-se, de forma sucinta, aspectos científicos das áreas envolvidas na problemática da remediação de solos.

No Capítulo 2 faz-se uma descrição dos materiais, reagentes e equipamentos utilizados e apresentam-se os métodos de trabalho utilizados na caracterização e classificação dos solos em estudo, na extração e desenvolvimento do consórcio microbiano, no estudo da distribuição dos contaminantes pelas diferentes fases dos solos e nos ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação realizados.

No Capítulo 3 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados, é analisado o seu significado e apresentado o modo como foram sendo integrados e permitiram a evolução dos estudos já efectuados.

No Capítulo 4 apresentam-se as conclusões possíveis a partir dos resultados alcançados, redefinem-se metas e planeiam-se os trabalhos futuros para concretizar os objectivos traçados.

Nos Anexos são apresentados os dados experimentais e os cálculos com eles realizados para obter os resultados sintetizados no Capítulo 3.

1.3. O SOLO

A definição de solo varia de acordo com os objectivos que se pretendem alcançar com a sua utilização e tem evoluído ao longo dos anos. Independentemente da definição que se lhe pretenda atribuir, é inquestionável que grande parte da superfície da Terra está coberta por solos. Os solos são a “pele” da Terra, constituem a interface entre a terra, o ar e a água, alojam a maior parte da biosfera, desempenham inúmeras funções e prestam serviços vitais à humanidade: é sobre eles, neles e com eles que se desenvolve toda a actividade humana; construímos as nossas habitações, produzimos os nossos alimentos e extraímos um grande número de matérias-primas minerais. Os solos funcionam como habitat e reserva de biodiversidade, purificam e armazenam água e são reservatório de carbono.

O solo é um recurso vital que regula todo o meio ambiente, mas, no entanto, este recurso encontra-se sujeito a uma enorme e crescente gama de pressões associadas às diversas actividades humanas (EEA, 2010); esta intensa actividade tem afectado a sua integridade e condicionado a sua capacidade de responder favoravelmente às solicitações.

A degradação da qualidade dos solos tem consequências ambientais, sociais e económicas muito preocupantes, agravadas pelo facto de a sua renovação ser extremamente lenta quando

vista à escala humana de tempo; a esta escala os solos são recursos finitos, limitados e não renováveis; a formação de uma camada de solo de 30 cm leva 1000 a 10000 anos a estar completa (Mateus, 2008).

Embora os solos sejam tão essenciais à vida e bem-estar social como o ar e a água, a sua degradação não tem recebido tanta atenção como a da água e a do ar (EEA, 2010). A preservação integral das funções dos solos depende da conservação das suas características geológicas, físicas, químicas e biológicas; no entanto, em muitos locais do planeta, os solos são sobre explorados, degradados e irreversivelmente afectados pelos impactes das actividades industriais, agrícolas e de mudança no seu uso, conduzindo, entre outras, a situações de impermeabilização, de contaminação, de erosão e de perda de carbono orgânico (EEA, 2010).

Os solos são misturas complexas e muito variadas, formadas a partir de materiais rochosos pré-existentes através da actuação de um conjunto de processos químicos, físicos e biológicos que actuam na superfície da crosta terrestre. Em função do litótipo da rocha mãe e do tipo e intensidade dos processos actuantes, formam-se diferentes tipos de solos com características mineralógicas, físicas, químicas e biológicas muito variadas. Quanto ao seu modo de formação, os solos são classificados em solos residuais e solos sedimentares.

Os solos residuais são os solos que permaneceram no local de meteorização, no local de jazida da rocha mãe, os seus constituintes não sofreram transporte. Os solos sedimentares são aqueles que sofreram transporte, os sedimentos foram levados do seu local de origem pelos agentes de transporte e posteriormente depositados, formando um depósito sedimentar.

Os solos apresentam natureza multifásica. São constituídos por uma fase sólida, formada por partículas minerais e matéria orgânica; uma fase líquida, normalmente constituída por água (livre, pelicular e/ou capilar) e uma fase gasosa constituída por ar, frequentemente rarefeito em oxigénio e enriquecido em dióxido de carbono. Na maioria dos solos é ainda possível encontrar uma fase biológica, constituída por microrganismos vivos. A composição volumétrica dos solos é muito variada. Nas zonas mais próximas da superfície é usual 15 a 30% de ar, 15 a 30% de água, 38 a 45 % de partículas minerais e 5 a 12% de matéria orgânica (Sims, 1990); com o aumento da profundidade a representação volumétrica da fracção mineral aumenta, diminuindo as restantes fracções devido ao aumento da compacidade das formações.

As partículas constituintes da fase sólida dos solos apresentam composição mineralógica, forma e dimensão variada o que condiciona as suas características e o seu comportamento. A fracção mineral dos solos é constituída por minerais primários provenientes da rocha mãe que apresentam a sua composição inalterada e minerais secundários que se formaram essencialmente por alteração de minerais primários menos resistentes.

No que respeita à granulometria os constituintes dos solos classificam-se em blocos ou calhaus (> 60 mm), seixos ou cascalhos (2 a 60 mm), areia (0,06 a 2 mm), siltes (0,002 a 0,06

mm) e argilas ($< 0,002$ mm). As partículas de maior dimensão são normalmente constituídas por minerais resistentes, predominantemente alumino-silicatos. As partículas de menor dimensão, as argilas, são a componente mais activa do sistema devido, não só às suas características dimensionais, mas também à sua forma e composição mineralógica. Na sua grande maioria, são alumino-silicatos hidratados, contendo magnésio e/ou ferro e apresentam-se na natureza com forma laminar, possuindo superfície específica muito elevada. Os minerais de argila mais frequentes nos solos são dos grupos da caulinite, da illite e da montmorilonite, a sua superfície específica varia entre 10 e 800 metros quadrados por grama de solo, enquanto numa areia está compreendida entre 0,001 e 0,04 metros quadrados por grama de solo (Matos Fernandes, 2006). A forma laminar característica das partículas de argila faz com que as suas moléculas constituintes se encontrem sempre muito perto da sua superfície, apresentando valências químicas não saturadas; as forças de natureza eléctrica assim geradas, atraem para a sua superfície iões positivos e moléculas de água (Matos Fernandes, 2006). Do exposto conclui-se que, devido à sua mineralogia e forma, as partículas argilosas para além de apresentarem elevada área superficial são quimicamente activas (Matos Fernandes, 2006).

A actividade química de uma argila é caracterizada pela capacidade que uma molécula de argila tem em atrair várias camadas de água e de iões positivos até ficar electricamente neutralizada. Na maior parte das situações os minerais de argila comportam-se como colóides electronegativos o que lhes confere um importante papel na adsorção e permuta de catiões. No caso das contaminações em solos, as moléculas de água presentes e as moléculas dos contaminantes competem pelos mesmos locais de adsorção. Quando os solos se encontram saturados e ocorre contaminação, as moléculas dos contaminantes dificilmente conseguem ficar retidas na fase sólida do solo uma vez que os locais de adsorção já se encontram ocupados pelas moléculas de água. Neste caso, os contaminantes são dissolvidos na fase líquida ou permanecem no sistema sob forma líquida não aquosa.

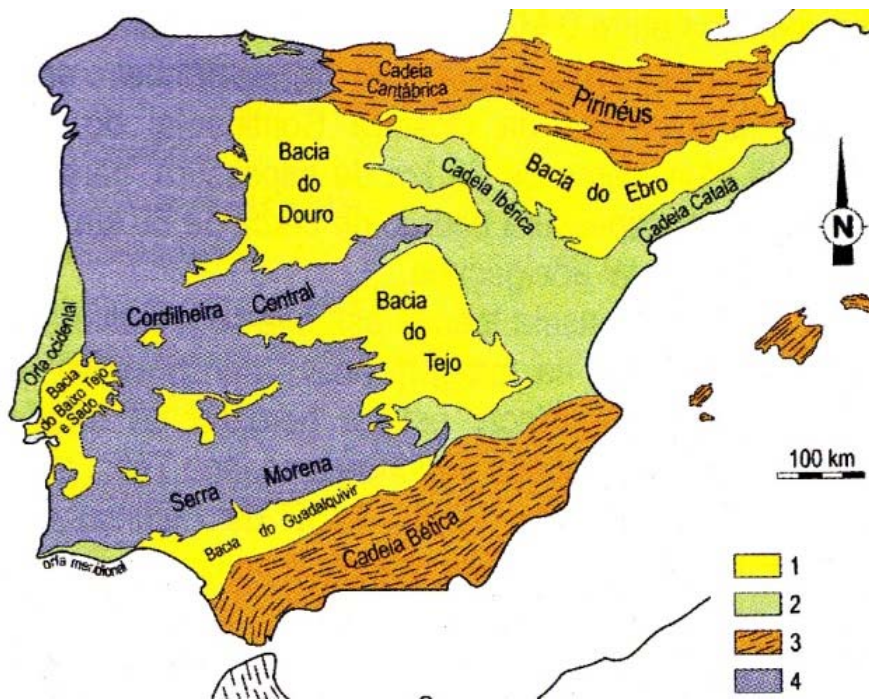
O modo como os contaminantes se movimentam e permanecem nos solos é condicionado não só pelas características específicas de cada contaminante mas também pelas características dos solos. As propriedades dos solos que mais afectam a movimentação, a distribuição e a bio-disponibilidade dos contaminantes são:

- i) a mineralogia, a granulometria, a textura e o teor em matéria orgânica;
- ii) a porosidade, o teor em água natural e o teor em água de saturação;
- iii) a capacidade de permuta iónica e a quantidade e características da fracção coloidal (argila e matéria orgânica).

1.4. SÍNTESE DA GEOLOGIA E SOLOS DE PORTUGAL

Considerando as grandes unidades tectónicas europeias, a Península Ibérica localiza-se na Meso-Europa Hercínica, sendo o Maciço Hespérico o seu fragmento rochoso fundamental. O Maciço Hespérico, com idade superior a 200 milhões de anos, forma um planalto sobrelevado ao mar, adjacente ao qual se instalaram posteriormente as bacias sedimentares. A Cordilheira

Central divide o Maciço Hespérico em dois blocos, a Meseta Norte que é drenada pelo rio Douro e a Meseta Sul que é drenada pelos rios Tejo, Sado e Guadiana (Ribeiro et al., 1979). Na Figura 1.1 é apresentado um esquema das unidades morfoestruturais da Península Ibérica.



1 – Bacias cenozóicas; 2 – Bacias mesocenozóicas com inversão tectónica alpina fraca a moderada;
3 – Cadeias Alpinas; 4 – Soco Hercínico

Figura 1.1 - Unidades morfoestruturais da Península Ibérica (Dias et al., 2006)

Em Portugal podem identificar-se cinco unidades geotectónicas: o Maciço Hespérico, a Orla Ocidental, a Orla Meridional, as Bacias do Baixo Tejo e Sado e a Margem Continental.

O Maciço Hespérico ocupa cerca de três quartos da área de Portugal Continental (Sousa Real, 1987), é constituído por formações muito antigas, anteriores ao mesozóico, pontualmente cobertas por retalhos de formações continentais terciárias e quaternárias (Ferreira, 2000; Sousa Real, 1987). Do ponto de vista litológico o Maciço Hespérico é fundamentalmente constituído por rochas metamórficas (metassedimentos de Paleozóico, Câmbrio e Pré-câmbrio) e magmáticas intrusivas. A cobertura pós-paleozóica encontra-se fundamentalmente nas Orlas Ocidental e Meridional e nas Bacias do Baixo Tejo e Sado; esta cobertura atinge no máximo 200 a 300 metros de profundidade e do ponto de vista litológico encontram-se nestas zonas fundamentalmente rochas sedimentares carbonatadas (calcários) e rochas sedimentares detríticas continentais (fundamentalmente areias e arenitos) (Ferreira, 2000; Soares da Silva, 1983; Sousa Real, 1987). Na Figura 1.2 é apresentada uma versão simplificada da carta litológica de Portugal (Ferreira, 2000).

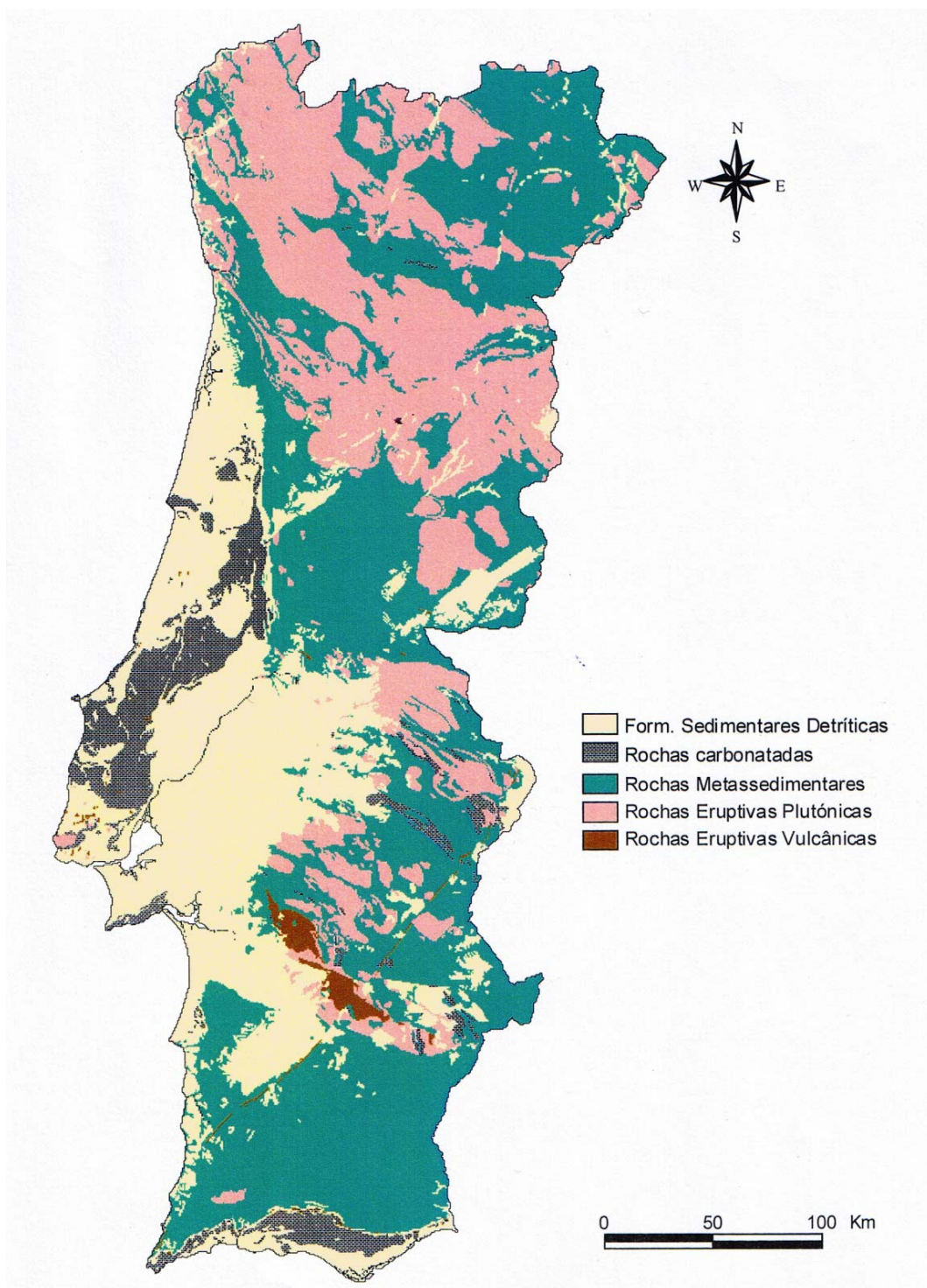


Figura 1.2 – Carta litológica simplificada de Portugal segundo o Atlas do Ambiente Digital (Ferreira, 2000)

Tal como já foi referido anteriormente, o litótipo das formações geológicas é um factor relevante no tipo de solos formados. Na Europa, foram identificados mais de 320 tipos principais de solos (CCE, 2006). Em Portugal, os solos residuais ocorrem dispersos por todo o país, sobrejacentes à rocha mãe que lhes deu origem e os solos sedimentares ocorrem fundamentalmente sob a forma de depósitos fluviais, lacustres ou marinhos. Como pode ser observado na Figura 1.3, de acordo com o Atlas do Ambiente e aplicando a classificação de solos preconizada pela FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2006), em Portugal predominam os cambissolos, litossolos, os podzóis, os luvisolos e os fluvisolos.

Os cambissolos são solos jovens que ocorrem em zonas de relevo acentuado sobre rocha mãe granítica ou calcária, pouco a moderadamente meteorizada; os litossolos estão normalmente associados a rocha mãe xistosa; os podzóis predominam em formações detríticas arenosas; os luvisolos são característicos de zonas graníticas planas e os fluvisolos desenvolvem-se em depósitos fluviais, lacustres ou marinhos recentes (Ferreira, 2000).

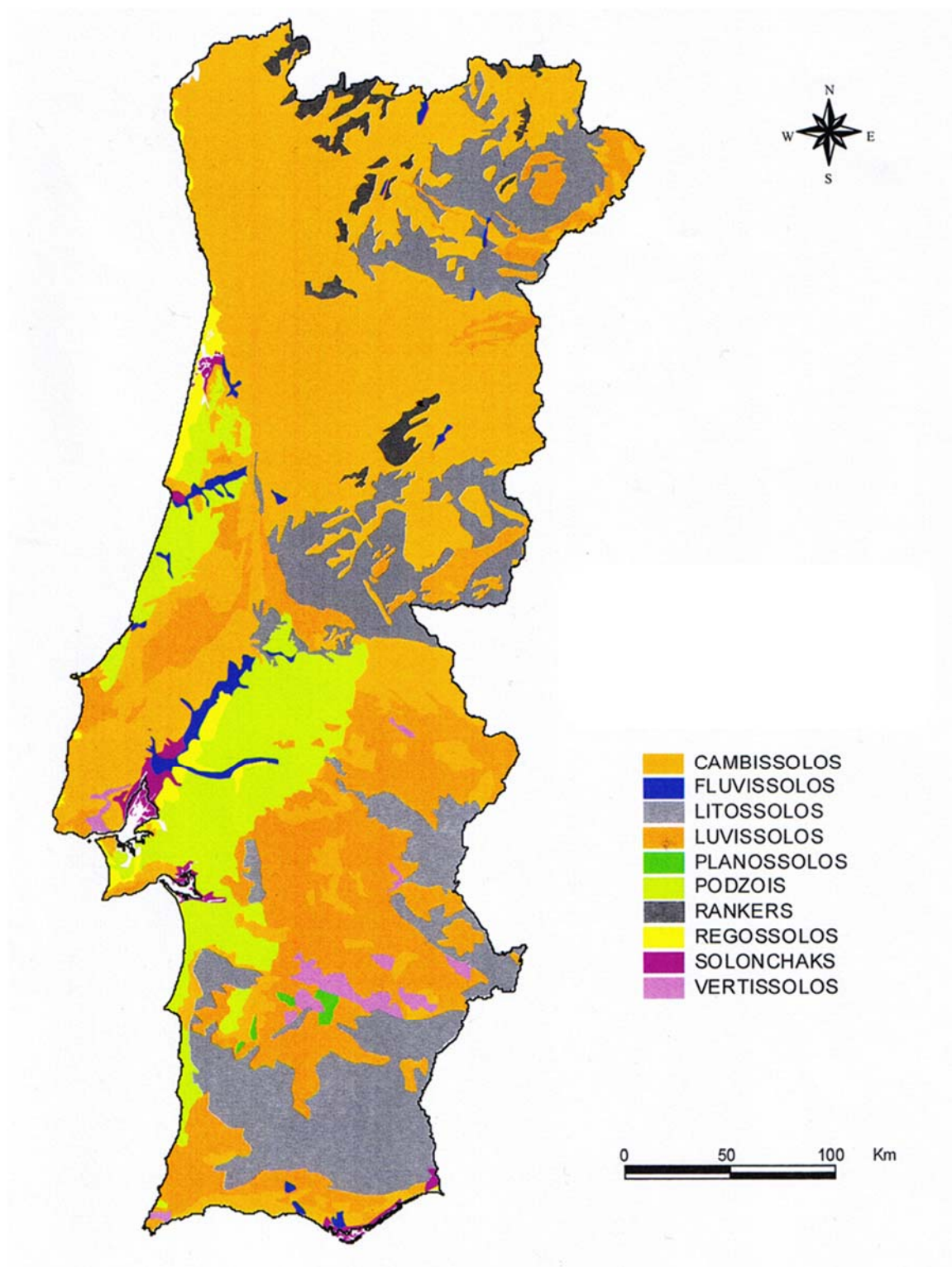


Figura 1.3 – Carta de solos de Portugal de acordo com a FAO segundo o Atlas do Ambiente Digital (Ferreira, 2000)

1.5. A CONTAMINAÇÃO DE SOLOS

A degradação do solo é um problema mundial grave e a sua contaminação com substâncias tóxicas é uma das mais importantes ameaças às suas capacidades. A degradação da qualidade dos solos tem impacto directo na qualidade da água, do ar, na biodiversidade e nas alterações climáticas, podendo também ameaçar a segurança dos alimentos e prejudicar a saúde dos cidadãos (CCE, 2006).

Mais de dois séculos de industrialização deixaram na Europa graves problemas relacionados com a contaminação de solos e o número de locais inventariados com actividades potencialmente poluidoras era, em 2007, cerca de três milhões, dos quais cerca de duzentos e cinquenta mil necessitavam de intervenção urgente (EEA, 2010). Esta informação da União Europeia não contempla dados de todos os países comunitários uma vez que nem todos possuem informação disponível, Portugal pertence ao grupo de países que não apresentou informação. Na mesma situação se encontram os dados europeus relativos às actividades causadoras de contaminação e aos contaminantes que mais afectam os solos e as águas subterrâneas. Na Figura 1.4 apresenta-se uma síntese da informação disponível. Os dados apresentados revelam que as actividades que mais causam contaminação são a produção industrial e os serviços comerciais (41,4 %), o tratamento de resíduos municipais (15,2 %) e a indústria petrolífera (14,1 %); evidenciam ainda que os contaminantes que mais afectam os solos e as águas subterrâneas são os metais pesados, os óleos minerais e os hidrocarbonetos aromáticos.

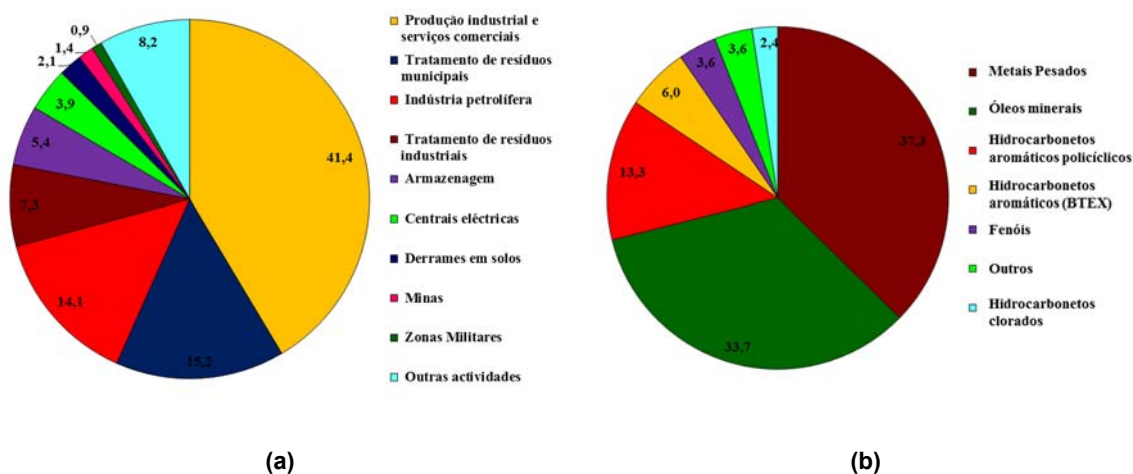


Figura 1.4 – Ponto da situação na Europa: (a) Actividades causadoras de contaminação. (b) Contaminantes que mais afectam os solos e as águas subterrâneas (EEA, 2009)

As informações apresentadas indicam que a situação dos solos contaminados na Europa não é a desejável, sendo a sua recuperação urgente uma vez que as áreas contaminadas apresentam riscos ao nível da segurança das populações, da saúde pública e dos ecossistemas e impõem

restrições à utilização dos solos e das águas subterrâneas, o que prejudica o desenvolvimento social e económico das populações. Infelizmente esta grave situação relativa à contaminação de solos é mundial, além do continente europeu, também nos Estados Unidos, segundo dados da Environmental Protection Agency (EPA), existe um grande número de locais contaminados, em zonas industriais, em zonas militares, em aterros, em bases aéreas e em minas (USEPA, 2010). Os dados relativos à situação na Ásia são mais escassos mas sabe-se, no entanto, que em 2006 existiam na China cerca de 100 000 km² de solos contaminados e cerca de 21 670 km² irrigados com água contaminada (Fiúza, 2009a).

Em 2010 a procura diária de petróleo atingiu os 87 milhões de barris por dia, prevendo-se que em 2035 sejam atingidos os 107,3 milhões de barris por dia (OCDE, 2012); o transporte global e o uso intensivo de petróleo e seus derivados fazem dos hidrocarbonetos petrolíferos principais contaminantes do meio ambiente, tanto em predominância como em quantidade (Tyagy et al., 2011).

De acordo com a comunicação da comissão das comunidades europeias denominada “Estratégia Temática de Protecção de Solos” (CCE, 2006), é necessária uma estratégia global para a protecção do solo na União Europeia em que os estados membros estejam obrigados a tomar as medidas específicas que julguem necessárias e convenientes para garantir a protecção e utilização sustentável dos solos. Os objectivos principais são a prevenção da degradação e a reabilitação dos solos degradados, garantindo um nível de funcionalidade mínimo coerente com a sua utilização actual e futura. Este documento estratégico estabeleceu algumas áreas de investigação para colmatar lacunas no conhecimento sobre os solos, sendo o tema “procedimentos e tecnologias operacionais para a protecção e a reabilitação do solo” um dos prioritários (CCE, 2006). O presente trabalho de investigação enquadrou-se nesta área temática.

Na Europa, a identificação de zonas de risco e a realização do inventário dos sítios contaminados, tal como foi definido na “Estratégia Temática de Protecção de Solos” (CCE, 2006), são actividades prioritárias a implementar durante um período de 25 anos. A sua implementação deverá custar, por ano, 240 a 290 milhões de euros; terminado este período, os custos anuais de manutenção deverão baixar significativamente para cerca de 2 milhões de euros (CCE, 2006).

1.6. DISTRIBUIÇÃO DOS CONTAMINANTES PELAS FASES CONSTITUINTES DOS SOLOS

O modo como os contaminantes se distribuem pelas diferentes fases dos solos é um aspecto muito relevante na problemática da “contaminação/descontaminação” de solos, uma vez que é determinante na mobilidade dos contaminantes, ditando a sua disponibilidade na descontaminação. O seu conhecimento é imprescindível na eleição do processo de remediação.

Quando os contaminantes chegam ao solo são afectados por um conjunto de fenómenos de transporte, de retardação, de atenuação e de incremento de mobilidade, o que condiciona o modo como se distribuem pelas diferentes fases do solo e consequentemente a selecção da tecnologia de reabilitação aplicável (Fiúza, 2009a). A volatilização, a solubilização, a sorção e a degradação são os fenómenos que mais condicionam as concentrações de contaminantes nas diferentes fases.

Os compostos orgânicos podem estar presentes nos solos como: uma película adsorvida nas partículas sólidas, vapor na fase gasosa existente nos poros do solo, compostos dissolvidos na água dos solos e uma fase líquida não aquosa (NAPL). A distribuição dos contaminantes pelas diferentes fases pode ser avaliada através do conhecimento de alguns parâmetros tais como: a pressão de vapor, a constante de Henry, a solubilidade e os coeficientes de partilha (Suthersan, 1997). Os coeficientes de partilha são constantes empíricas que descrevem como um composto se distribui entre duas fases; no âmbito da contaminação de solos é usual considerar o coeficiente de partilha octanol-água, o coeficiente de partilha solo-água e o coeficiente de partilha do carbono orgânico. Na Figura 1.5 apresenta-se esquematicamente a distribuição dos contaminantes pelas diferentes fases do solo e a influência dos parâmetros supracitados.

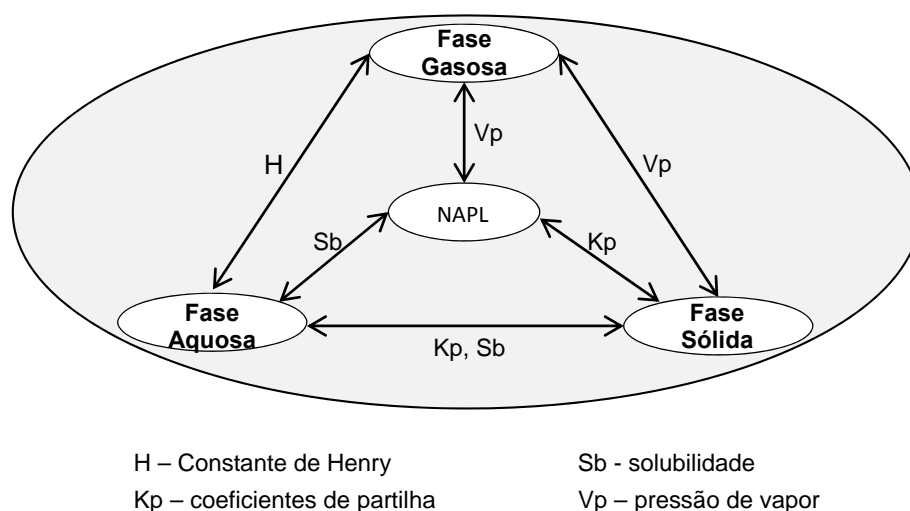


Figura 1.5 – Distribuição dos contaminantes pelas diferentes fases do solo (Suthersan, 1997).

1.6.1. PARTIÇÃO NAS FASES LÍQUIDA E GASOSA

A distribuição dos contaminantes nas fases líquida e gasosa dos solos depende principalmente das características físicas e químicas das substâncias. A pressão de vapor, a solubilidade em água, a constante de Henry e o coeficiente de partilha octanol-água (K_{ow}) são os parâmetros mais relevantes nesta análise.

A pressão de vapor (V_p) de uma substância é a pressão em equilíbrio entre a fase gasosa e a substância em estado sólido ou líquido. É uma medida da tendência de um composto se volatilizar. Compostos com pressão de vapor elevada apresentam elevada mobilidade por volatilização.

A constante de Henry (H) é uma medida da volatilidade, a uma dada temperatura, das substâncias dissolvidas, sendo utilizada para relacionar a concentração de um composto na fase de vapor com a sua concentração na fase líquida (partilha ar-água); no equilíbrio, a pressão parcial de um soluto volátil é proporcional à sua concentração na solução. A constante de Henry tem um intervalo de variação muito grande; valores elevados ocorrem em substâncias com pressão de vapor alta, ponto de ebulição baixo e solubilidade baixa, como por exemplo os alcanos, valores baixos ocorrem em substâncias com elevada solubilidade em água e baixa pressão de vapor.

A solubilidade (S_b) é uma medida da capacidade de uma substância se dissolver em água. É um factor altamente condicionante da mobilidade dos compostos orgânicos derramados nos solos. Os compostos orgânicos muito solúveis dissolvem-se na água dos solos e dispersam-se, enquanto os compostos pouco solúveis tendem a ficar adsorvidos na fase sólida, a volatilizar ou a formar fases líquidas não aquosas.

O coeficiente de partilha octanol-água (K_{ow}) é definido pela razão entre a concentração de composto no octanol e a sua concentração na água. Os valores de K_{ow} variam entre 10^{-1} e 10^{-7} e são uma medida da hidrofobicidade, quanto maior for o seu valor mais hidrófoba é a substância (Mackay, 2001); são igualmente um indicador da lipoficidade e portanto da capacidade de penetração nos tecidos dos organismos vivos.

1.6.2. PARTIÇÃO NA FASE SÓLIDA - SORÇÃO

Define-se sorção como a transferência selectiva de um ou mais solutos a partir de uma fase fluida para uma fase sólida, a operação inversa denomina-se dessorção (Perry et al., 1984). A sorção dos contaminantes nas partículas sólidas dos solos afecta a sua mobilidade, condicionando o seu transporte e a sua bio-disponibilidade. A avaliação da sorção é fundamental quer no estudo da contaminação, quer na elaboração do projecto de descontaminação, uma vez que as características da sorção dos compostos perigosos pelos

solos ajudam a compreender o alcance das contaminações e a seleccionar a tecnologia de remediação mais adequada. A sorção nos solos é condicionada pelas características da matriz sólida (mineralogia, teor em matéria orgânica, textura e estrutura), pelas características da fase fluida presente (teor em água, pH, salinidade) e pelas propriedades dos contaminantes (forma e tamanho das moléculas, polaridade, hidrofobicidade, solubilidade, pressão de vapor).

A sorção inclui mecanismos de absorção e mecanismos de adsorção; na absorção o soluto é acumulado no interior dos constituintes da fase sólida, enquanto na adsorção ocorre acumulação de soluto numa interface, por exemplo na superfície das partículas sólidas.

A adsorção pode ser de dois tipos, química ou física. Na adsorção química as forças de ligação são de alta energia, pelo que o processo é naturalmente irreversível; na adsorção física as ligações são de baixa energia, normalmente forças de Van der Waals, o processo é reversível e o contaminante pode mover-se, condensar nos poros ou capilares ou formar multicamadas (Khalfaoui et al., 2003). A adsorção física apresenta um baixo grau de especificidade, enquanto a adsorção química depende da reactividade existente entre o adsorvente e o soluto, conferindo-lhe maior grau de especificidade. A adsorção química limita o transporte e fixa os contaminantes na fase sólida (Eweis et al., 1999).

A adsorção é condicionada pelas propriedades dos contaminantes e características dos solos. Quando os solos apresentam teores em água elevados, há grande probabilidade das partículas sólidas estarem cobertas por uma película de água ficando a sua capacidade de adsorção muito diminuída (Suthersan, 1997). Na Figura 1.6 ilustra-se a capacidade de cobertura das superfícies minerais em função do teor em água, considerando três situações: solo seco, solo húmido e solo saturado. Estudos realizados por Chiou e Shoup (1985), Pennell (1992) e Poulsen (1998), mostraram que a capacidade de adsorção de solos secos a muito secos é muito superior à do mesmo solo saturado (Jorge, 2003).

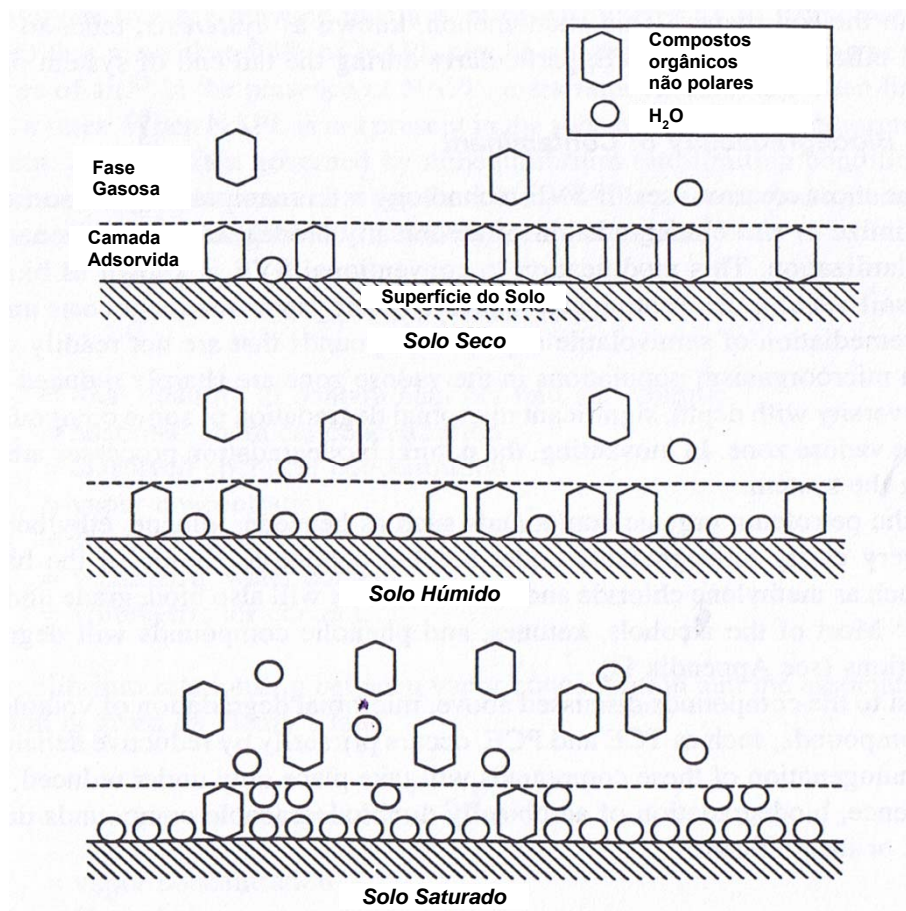


Figura 1.6 - Cobertura das superfícies minerais em função do teor em água.
Adaptado de (Suthersan, 1997).

Nos solos a adsorção pode ocorrer nas partículas minerais e/ou na matéria orgânica. O coeficiente de partilha solo-água e o coeficiente de partilha do carbono orgânico são medidas da repartição de um composto entre a fase sólida e a fase aquosa do solo. O coeficiente de partilha solo-água (K_s) é definido pela razão entre a concentração de composto no solo e a sua concentração na água. Devido ao seu carácter não polar, a maioria dos compostos orgânicos apresenta baixa probabilidade de serem adsorvidos pelas moléculas de argila (Suthersan, 1997), pelo que, na maioria dos solos, os compostos orgânicos são quase exclusivamente adsorvidos pela matéria orgânica. Define-se então o coeficiente de partilha do carbono orgânico (K_{co}) como sendo a razão entre a concentração de composto adsorvido pelo carbono orgânico e a sua concentração na água. O K_{co} pode ser determinado pelo cálculo da razão entre o valor do coeficiente de adsorção do composto obtido experimentalmente a partir da construção das isotérmicas de adsorção e a fracção de carbono orgânico no solo. Existem várias correlações entre K_{ow} , K_{co} e a solubilidade; de um modo geral, K_{oc} aumenta linearmente com o aumento de K_{ow} e com a diminuição da solubilidade (Kuo, 1999).

Os coeficientes de partilha K_s e K_{co} permitem avaliar a mobilidade que um composto tem no solo; quanto mais elevado for o seu valor maior a propensão para o composto ser adsorvido pelo solo.

O estudo experimental da relação entre a quantidade de contaminante adsorvida pelo solo e a sua concentração nas fases líquida e/ou gasosa, a temperatura constante, permite obter as isotérmicas de adsorção no equilíbrio. A metodologia experimental consiste em colocar diferentes concentrações conhecidas de contaminante em contacto com o solo até atingir o equilíbrio e, posteriormente, avaliar a quantidade de contaminante adsorvido e a sua concentração de equilíbrio na fase fluida. Os resultados obtidos podem ser apresentados graficamente e/ ou interpretados com recurso a modelos matemáticos; os modelos de Langmuir e Freundlich são dois dos mais utilizados (Perry et al., 1984; Suthersan, 1997).

1.6.3. MODELOS MATEMÁTICOS ASSOCIADOS À DISTRIBUIÇÃO DOS CONTAMINANTES

1.6.3.1. ISOTÉRMICAS DE ADSORÇÃO

Segundo as recomendações da IUPAC - International Union of Pure and Applied Chemistry, há seis casos típicos de isotérmicas de adsorção física de gases, os primeiros cinco tipos correspondem às isotérmicas típicas segundo Brunauer, Deming, Deming e Teller e o sexto tipo corresponde à isotérmica em degraus que ocorre no caso de haver saturações parciais (Khalfaoui et al., 2003; Perry et al., 1984). Na Figura 1.7 representam-se os seis casos típicos de isotérmicas de adsorção física (Khalfaoui et al., 2003; Perry et al., 1984; Ryu et al., 1999).

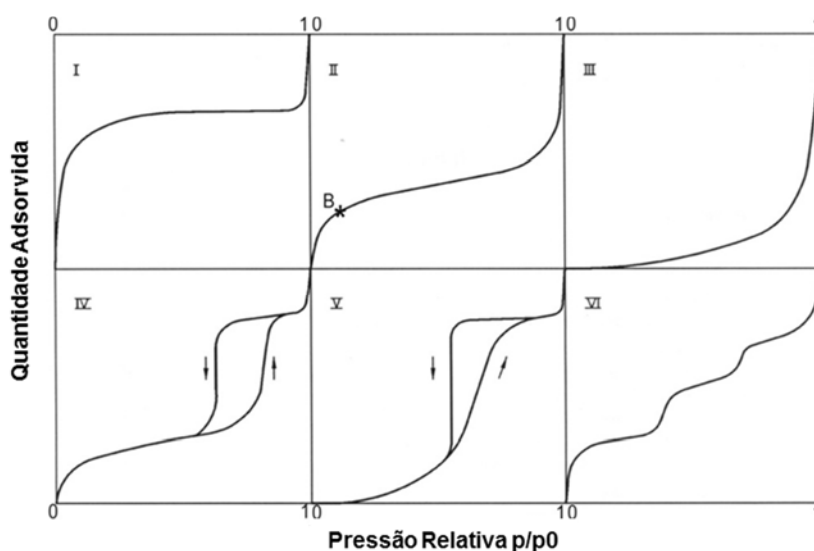


Figura 1.7 – Isotérmicas de adsorção física segundo IUPAC (Ryu et al., 1999)

Nas isotérmicas Tipo I verifica-se um aumento bastante rápido da concentração na fase sólida com o aumento da concentração (ou pressão) no equilíbrio, até ser atingido o patamar de saturação. Corresponde a adsorção em monocamada numa superfície energeticamente uniforme (Khalfaoui et al., 2003). A isotérmica tem forma convexa, é favorável à adsorção (Perry et al., 1984) e está associada à adsorção química em materiais com micróporos (Proença, 2011; Ryu et al., 1999).

As isotérmicas Tipo II descrevem um sistema que apresenta várias camadas de adsorção e a cada camada corresponde uma energia diferente, sendo a energia da primeira camada superior à da segunda e assim sucessivamente (Khalfaoui et al., 2003). No ponto B é atingida a saturação da monocamada e para concentrações elevadas ocorre condensação. Este tipo de isotérmicas corresponde, normalmente, a situações de adsorção física em sólidos não porosos (Proença, 2011; Ryu et al., 1999).

Nas isotérmicas Tipo III supõe-se que todos os locais de adsorção podem ser ocupados por um número infinito de moléculas com a mesma energia de ligação; quando o número de moléculas adsorvidas é grande, pode ocorrer condensação (Khalfaoui et al., 2003). São pouco frequentes e correspondem a um mecanismo de adsorção em que as interações gás - sólido são particularmente fracas (Proença, 2011; Ryu et al., 1999).

As isotérmicas do Tipo IV são características de materiais com mesoporos, a parte inicial da isotérmica é semelhante ao Tipo II mas seguidamente apresentam um patamar a pressões altas. Quando a condensação e a evaporação do adsorvato nos poros ocorrem a pressões diferentes, formam um ciclo de histerese (Proença, 2011; Ryu et al., 1999).

As isotérmicas do Tipo V são pouco comuns e características de materiais com micro e mesoporos, verificando-se fraca interação gás-sólido (Proença, 2011; Ryu et al., 1999).

As isotérmicas do Tipo VI correspondem a adsorção em multicamada em superfícies uniformes não porosas, cada patamar corresponde a uma camada de adsorção (Proença, 2011; Ryu et al., 1999).

1.6.3.2. MÉTODOS DE ANÁLISE DAS ISOTÉRMICAS DE ADSORÇÃO

Existem vários modelos de análise das isotérmicas de adsorção e tal como já foi anteriormente referido, os modelos de Langmuir e Freundlich são dois dos mais utilizados.

O modelo de Langmuir é um modelo teórico, não linear, baseado numa visão simplificada do fenómeno de adsorção, aplica-se a adsorção em superfícies energeticamente homogéneas e, cada molécula adsorvida, ocupa um único local de adsorção, sendo as interações entre as moléculas adsorvidas negligenciáveis; corresponderá a uma isotérmica do Tipo I (Perry et al., 1984; Weber et al., 1996). A capacidade máxima de adsorção representa a cobertura de uma

monocamada de moléculas e pode ser determinada a partir deste modelo através da Equação 1.1.

Equação 1.1: $q = \frac{K_L b C_{eq}}{1 + K_L C_{eq}}$

onde: q é a massa de adsorvato por unidade de massa de adsorvente, C_{eq} é a concentração, em equilíbrio, na fase fluida, b é a capacidade máxima de adsorção e K_L é uma constante relacionada com a energia de ligação do adsorvato ao adsorvente (constante de Langmuir).

A linearização da Equação 1.1 permite obter a Equação 1.2.

Equação 1.2: $\frac{1}{q} = \frac{1}{K_L b} \times \frac{1}{C_{eq}} + \frac{1}{b}$

A representação gráfica de “ $1/q$ versus $1/C_{eq}$ ” permite determinar os coeficientes K_L e b . O coeficiente angular da recta obtida dá indicações sobre a energia de ligação e a capacidade máxima de adsorção e o coeficiente linear será o inverso da capacidade máxima de adsorção. O ajuste não linear à representação gráfica “ q versus C_{eq} ” também permite determinar os coeficientes K_L e b .

O modelo de Freundlich é empírico, corresponde a uma distribuição exponencial da adsorção e descreve os resultados experimentais da adsorção numa camada energeticamente heterogénea (Perry et al., 1984; Weber et al., 1996). Embora seja um modelo não linear pode, em muitas aplicações ambientais, obter-se uma isotérmica linear (caso em que $n=1$) (Kuo, 1999). Neste modelo a quantidade adsorvida tende para infinito, correspondendo à formação de multicamadas de moléculas adsorvidas; a sua equação geral é seguidamente apresentada na Equação 1.3.

Equação 1.3: $q = K_F C_{eq}^n$

onde: q é a massa de adsorvato por unidade de massa de adsorvente, C_{eq} é a sua concentração em equilíbrio na fase fluida, K_F é uma constante relacionada com a capacidade do adsorvente reter o adsorvato (constante de Freundlich) e n é uma constante relacionada com a afinidade entre o adsorvente e o adsorvato.

A linearização da Equação 1.3 permite obter a Equação 1.4.

Equação 1.4: $\log q = \log K_F + n \log C_{eq}$

As representações gráficas de “ q versus C_{eq} ” ou de “ $\log(q)$ versus $\log(C_{eq})$ ” permitem determinar os valores de K_F e n ; K_F reflecte a capacidade de adsorção do adsorvente e n o grau de heterogeneidade da superfície, sendo uma medida da estabilidade do processo de adsorção. Valores de n superiores à unidade correspondem a isotérmicas favoráveis à adsorção e valores de n inferiores à unidade correspondem a isotérmicas desfavoráveis à adsorção; quando n é igual a um a isotérmica de adsorção é linear (Weber et al., 1996).

Os solos naturais são geralmente meios heterogêneos e complexos pelo que o modelo de Langmuir é frequentemente referido como pouco adequado à interpretação da adsorção em solos (Bailey et al., 1968; Jorge, 2003; Mohapatra et al., 2007). Contrariamente, vários autores referem a capacidade do modelo do Freundlich para descrever a adsorção em solos (Albergaria et al., 2010b; Green et al., 1990; Jorge, 2003).

Segundo Chiou e Shoup (1985), em solos secos as isotérmicas de adsorção dos contaminantes orgânicos voláteis são não lineares, enquanto nos sistemas aquosos e na matéria orgânica do solo são tendencialmente lineares (Jorge, 2003). Segundo Lion (1991), Peterson (1998) e Farrel e Reinhard (1994), a adsorção linear pode também ser aplicada na adsorção de gases a baixas concentrações e em superfícies minerais com muitos locais de adsorção (Jorge, 2003).

1.6.3.3. FUGACIDADE

Grande parte dos modelos matemáticos utilizados neste trabalho são multifásicos e utilizam como critério de equilíbrio o conceito de fugacidade. Por esta razão, vai ser feita uma pequena introdução a este conceito.

Em 1901, G. N. Lewis introduziu um novo critério de equilíbrio em sistemas. Este novo critério permitiu ultrapassar os problemas relacionados com a utilização do potencial químico como critério de equilíbrio num sistema e foi denominado de fugacidade (Mackay, 2001). A fugacidade é uma medida do potencial químico, na forma de uma pressão ajustada; é possível estabelecer valores absolutos de fugacidade porque, para pressões baixas e em condições ideais, a fugacidade é igual à pressão parcial (Fiúza, 2010). A fugacidade tem uma relação logarítmica com o potencial químico e uma relação linear ou quase linear com a concentração (o contrário daquilo que acontece com o potencial químico). Duas fases estão em equilíbrio quando a sua fugacidade é igual.

A fugacidade não é uma propriedade química dos compostos, é um parâmetro intrinsecamente relacionado com o potencial químico e quantifica a tendência de um composto preferir uma fase do sistema relativamente a outra: a fase com menor fugacidade será a mais estável porque minimiza a energia livre de Gibbs (Fiúza, 2010; Mackay, 2001). A fugacidade é uma função de estado da matéria a uma determinada temperatura, aplica-se a gases não-ideais, a líquidos e a sólidos. O quociente entre a fugacidade e a pressão define o coeficiente de fugacidade, que

pode ser interpretado como uma medida da aproximação à idealidade uma vez que, para gases a baixas pressões, a fugacidade é aproximadamente igual à pressão e o coeficiente de fugacidade será igual à unidade (Fiúza, 2010).

Tal como já foi referido e se expressa na Equação 1.5, existe uma relação quase linear entre a concentração e a fugacidade; a constante de proporcionalidade dessa relação denomina-se “capacidade compartimental”. A capacidade compartimental é função da natureza do soluto, da natureza do meio (compartimento), da temperatura, da pressão e da concentração.

Equação 1.5: $C_i = f_i \times Z$

onde: C_i é a concentração expressa em mol m^{-3} , f_i é a fugacidade em Pa e Z é a capacidade compartimental em $\text{mol m}^{-3}\text{Pa}^{-1}$.

Esta metodologia considera que os sistemas ambientais são constituídos por vários compartimentos ambientais ou fases, sendo que cada compartimento ambiental pode ser constituído por vários sub-compartimentos (Mackay, 2001). No caso dos solos, é usual considerarem-se três compartimentos ambientais: ar, água e partículas sólidas; no caso das partículas sólidas podem considerar-se vários sub-compartimentos, como as partículas minerais, a matéria orgânica e a fracção argilosa.

Nos casos em que existam equações termodinâmicas já definidas, como para o ar e para a água, os valores de Z podem ser estimados através da equação termodinâmica apropriada para a fugacidade. Em outras situações é mais conveniente estimar os valores de Z a partir dos coeficientes de partição; nas Equações 1.6, 1.7, 1.8 e 1.9 apresentam-se as expressões normalmente utilizadas.

Equação 1.6: $Z_g = \frac{1}{R T}$

Equação 1.7: $Z_w = \frac{1}{H}$

Equação 1.8: $Z_o = \frac{Z_w}{K_{ow}}$

Equação 1.9: $Z_s = \frac{K_{co} f_{co} \rho_s}{H}$

onde: Z_g é a capacidade compartimental do ar, Z_w é a capacidade compartimental da água, Z_o é a capacidade compartimental do octanol, Z_s é a capacidade compartimental dos sólidos, R é a constante dos gases perfeitos ($8,314 \text{ Pa m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T é a temperatura absoluta em K, H é a constante de Henry em $\text{Pa m}^3 \text{ mol}^{-1}$, K_{ow} é o coeficiente de partilha octanol água em L kg^{-1} , K_{co} é o coeficiente de partilha do carbono orgânico em L kg^{-1} , f_{co} é a fracção de carbono orgânico e ρ_s a massa volúmica dos sólidos em kg m^{-3} .

Mackay, na sua metodologia para descrição quantitativa do meio ambiente utiliza modelos comportamentais baseados na fugacidade, estes modelos estão classificados em 5 níveis, seguidamente apresentados (Mackay, 2001):

- ✓ Nível 1 – Sistema fechado em equilíbrio e ausência de reacções;
- ✓ Nível 2a – Sistema em equilíbrio, com fontes e sumidouros e em estado estacionário;
- ✓ Nível 2b – Sistema em equilíbrio, com fontes e sumidouros e em estado transiente;
- ✓ Nível 3 – Sistema em ausência de equilíbrio, com fontes e sumidouros e em estado estacionário;
- ✓ Nível 4 – Sistema em ausência de equilíbrio, com fontes e sumidouros e em estado transiente.

A complexidade dos modelos aumenta do nível 1 para o nível 4 e cada nível, apresenta um conjunto de pressupostos.

No nível 1 a massa de contaminante é constante e está distribuída entre os compartimentos ambientais de acordo com os coeficientes de partilha no equilíbrio, são conhecidos a massa total do sistema e os volumes de cada compartimento, mas é desconhecida a concentração em cada compartimento.

No nível 2a existe equilíbrio entre as fases, mas podem ocorrer reacções com cinética de 1ª ordem ou de pseudo 1ª ordem num ou em vários compartimentos.

No nível 2b existe equilíbrio entre as fases, mas a fugacidade não é constante no tempo.

No nível 3 não existe equilíbrio entre as fases e podem ocorrer entradas e saídas autónomas nos diferentes compartimentos. É admitido o estado estacionário.

No nível 4 não existe equilíbrio entre as fases, podem ocorrer entradas e saídas autónomas nos diferentes compartimentos e não é admitido o estado estacionário.

1.7. REABILITAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS

A reabilitação de solos é uma tarefa difícil, demorada e dispendiosa; no entanto, nas últimas décadas, tem-se verificado um grande desenvolvimento nesta área; a utilização de tecnologias de reabilitação de solos tem progredido muito. Desde os finais dos anos 70 do século XX que se reconhece as consequências nefastas na saúde pública resultantes da existência de solos contaminados e desde então a maioria dos países desenvolvidos tem criado legislação

específica (Fiúza, 2009a), o que tem impulsionado o desenvolvimento das tecnologias de reabilitação de solos contaminados.

A natureza multifásica dos solos determina o modo como os contaminantes se repartem pelas diferentes fases e condiciona a selecção das tecnologias de remediação aplicáveis. Tal como foi anteriormente referido, a grande maioria dos contaminantes existentes nos solos tem natureza antropogénica, resultando de derrames durante a manipulação e/ou de fugas a partir dos dispositivos de armazenamento. A escolha de uma tecnologia de reabilitação tem, em cada caso, de considerar critérios técnicos, económicos, sociais, legais e ambientais. Destacam-se, pela importância no apoio à tomada de decisão, os seguintes parâmetros que condicionam a escolha da tecnologia de remediação:

- ✓ características dos contaminantes;
- ✓ características dos solos;
- ✓ posição do nível freático;
- ✓ níveis de contaminação;
- ✓ concentração mínima a atingir;
- ✓ tempo de remediação;
- ✓ características dos solos após remediação (manutenção das propriedades físicas e químicas, geológicas e biológicas do solo original);
- ✓ condições de aplicação da tecnologia (dados necessários, segurança, manutenção, resíduos gerados, aceitação pública) e
- ✓ custo total.

As tecnologias de reabilitação podem ser aplicadas *in situ* ou *ex situ*, podendo algumas tecnologias de reabilitação ser aplicadas tanto numa como noutra situação. As tecnologias *in situ* são utilizadas directamente no local contaminado sem escavação do solo. As tecnologias *ex situ* preconizam a remoção dos solos contaminados e o seu tratamento numa instalação construída para o efeito, podendo este tratamento ser realizado no local com recurso a uma estação de tratamento móvel ou fora do local.

As tecnologias *in situ* são mais económicas, mas apresentam alguns inconvenientes relacionados com a necessidade de maior tempo de remediação, maior incerteza nos resultados e dificuldades na monitorização do processo; havendo a possibilidade de criar efeitos perversos quando mal concebidas e monitorizadas. As tecnologias *ex situ* são mais dispendiosas mas mais rápidas; removem o contaminante e o solo contaminado do local, evitando alastramento da contaminação e permitindo uma fácil monitorização do processo.

Em função do mecanismo aplicado no tratamento dos solos contaminados, as tecnologias de reabilitação podem agrupar-se em quatro grandes classes: tecnologias físicas, tecnologias químicas, tecnologias biológicas e tecnologias térmicas.

Nas tecnologias físicas e químicas utilizam-se as propriedades físicas e/ou químicas dos contaminantes e/ou do meio contaminado para destruir, separar ou conter a contaminação. Nos processos físicos é induzida a transferência de fase do contaminante e nos processos químicos a estrutura química do contaminante é alterada através de reacções químicas, dando origem a compostos menos tóxicos e/ou mais facilmente separáveis da fase sólida dos solos (USEPA, 2006a).

Nas tecnologias biológicas os contaminantes são transformados, através da acção do metabolismo dos microrganismos, em substâncias ambientalmente inócuas, tais como a água, dióxido de carbono, ácidos gordos e biomassa. Estas tecnologias são normalmente mais lentas do que as físicas e químicas mas, globalmente, menos dispendiosas (USEPA, 2006a).

As tecnologias térmicas proporcionam reabilitações rápidas, mas podem ser muito dispendiosas devido ao custo da energia necessária para destruir os contaminantes, por aplicação de elevadas temperaturas. Estes processos usam o calor para queimar, decompor, destruir ou transferir os contaminantes para outra fase (USEPA, 2006a).

No Figura 1.8 apresenta-se uma síntese das principais tecnologias utilizadas na reabilitação de solos contaminados. Algumas destas tecnologias produzem efluentes gasosos contaminados que têm de ser recolhidos e tratados.

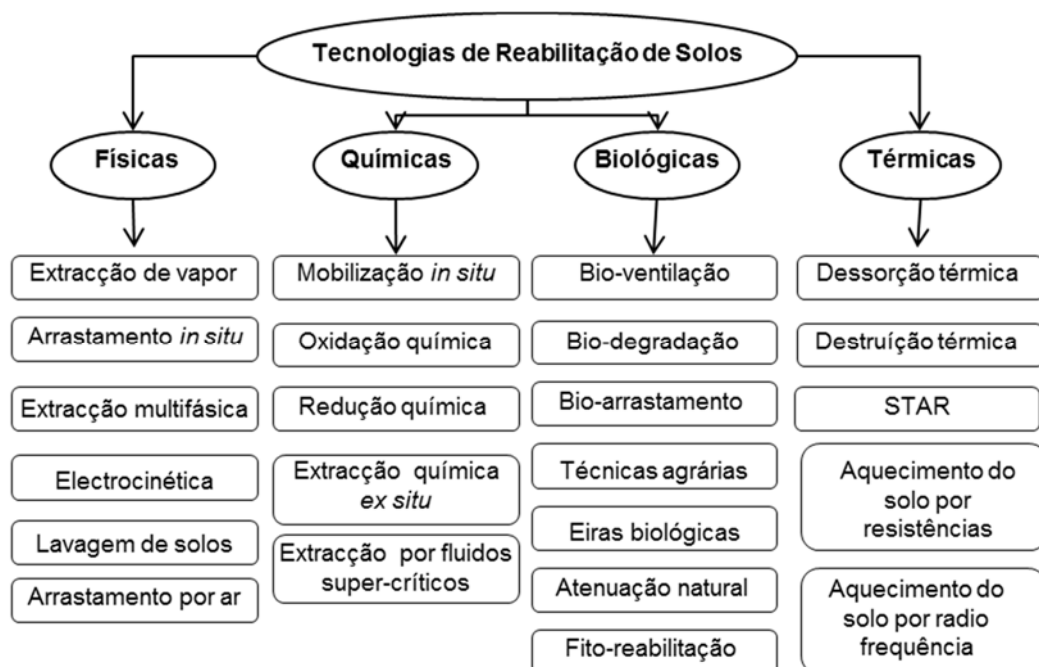


Figura 1.8 - Tecnologias de reabilitação de solos. Adaptado de (Kuo, 1999).

1.7.1. TECNOLOGIAS FÍSICAS

A extracção de vapor, o arrastamento *in situ* (air sparging), a extracção multifásica, a electrocinética, a lavagem de solos e o arrastamento por ar (air stripping) são as principais tecnologias físicas de reabilitação de solos (Fiúza, 2009a).

Na extracção de vapor provoca-se, através da aplicação de uma fonte de vácuo à matriz do solo, a volatilização dos compostos orgânicos voláteis e semivoláteis. Esta tecnologia é, normalmente, aplicada a compostos leves, tais como os constituintes da gasolina.

No arrastamento *in situ* (air sparging) é promovida a transferência dos contaminantes (normalmente hidrocarbonetos) dissolvidos para a fase gasosa por volatilização. Injecta-se ar na zona saturada, criando bolhas de ar que se elevam, permitindo a transferência de hidrocarbonetos dissolvidos na fase gasosa por volatilização. Simultaneamente, a zona de infiltração é submetida a ventilação, que arrastará os contaminantes volatilizados para o exterior (Fiúza, 2009a).

A extracção multifásica realiza-se *in situ* e consta da extracção simultânea de compostos orgânicos livres e de vapores da água subterrânea. Permite a remoção de fases orgânicas livres não solubilizadas, quer na zona de infiltração quer na zona saturada.

A remediação por electrocinética utiliza-se na remoção de metais pesados ou compostos orgânicos polares em solos de baixa permeabilidade.

A lavagem de solos funciona como um pré-tratamento para reduzir o volume de solos contaminados, que serão posteriormente tratados por processos específicos. Utiliza-se na remoção de contaminantes orgânicos, inorgânicos e radioactivos que se concentram nas fracções argilosa e orgânica dos solos.

O arrastamento por ar (air stripping) promove a transferência do contaminante da fase líquida para a fase gasosa através da aplicação, numa coluna de empacotamento, de uma contra corrente entre o débito da fase aquosa contaminada e um débito de ar muito superior; no decurso do processo, o contaminante é transferido da fase líquida para a fase gasosa (Fiúza, 2009a). Esta tecnologia aplica-se na remoção de compostos orgânicos voláteis existentes na água subterrânea.

1.7.2. TECNOLOGIAS QUÍMICAS

A mobilização química *in situ* (soil flushing), a oxidação química, a redução química, a extracção química *ex situ* e a extracção por fluidos supercríticos podem ser referidas como as principais tecnologias químicas de reabilitação (Fiúza, 2009a).

A mobilização química *in situ* aplica-se nas contaminações na zona de infiltração do solo, é especialmente indicada para a remoção de metais pesados (por exemplo Cr(VI) e Pb(II)) e materiais radioactivos. Os contaminantes são dissolvidos e transportados para a zona saturada e posteriormente recuperados por bombagem da água subterrânea.

A oxidação química é especialmente indicada para compostos orgânicos halogenados. Os oxidantes mais vulgares são o permanganato de sódio, o reagente de Fenton e o persulfato de sódio. Nos últimos anos tem havido evoluções significativas na sua aplicação *in situ* (Fiúza, 2009a).

A redução química utiliza como principal reagente químico redutores nano-particulados, aplica-se na remediação de solos contaminados com etenos halogenados e aniões inorgânicos. Uma variante recente é a utilização de ferro nano-particulado emulsionado no tratamento de fases líquidas densas não aquosas (DNAPL) (Fiúza, 2009a).

A extracção por fluidos supercríticos utiliza um fluido em condições de temperatura e pressão elevadas, para dissolver os compostos orgânicos presentes no solo; posteriormente, por abaixamento da temperatura e da pressão, os contaminantes são libertados. A oxidação por água crítica e a extracção por dióxido de carbono supercrítico são os processos mais utilizados.

1.7.3. TECNOLOGIAS BIOLÓGICAS

Nas tecnologias biológicas, os microrganismos metabolizam os compostos orgânicos, transformando-os em substâncias inofensivas para a natureza, utilizando o carbono como fonte de energia. Quando a actividade biológica é aeróbia o oxigénio é utilizado como dador de electrões e, quando a mineralização é completa, os produtos finais são dióxido de carbono e água (Malina et al., 2002). A bio-ventilação, o bio-arrastamento *in situ*, a atenuação natural, a bio-degradação *in situ*, as técnicas agrárias, as eiras biológicas e a fito-remediação são as técnicas biológicas aérobias mais utilizadas na reabilitação de solos.

A bio-ventilação e o bio-arrastamento *in situ* são tecnologias idênticas à extracção de vapor e ao arrastamento *in situ* mas, nestes casos, a introdução de oxigénio não tem como objectivo último a volatilização do contaminante, mas sim garantir um aporte de oxigénio em quantidades suficientes para que ocorra bio-degradação aeróbia do contaminante. Os caudais de ventilação e a quantidade de bolhas de ar são muito inferiores aos utilizados naquelas tecnologias. Embora menos comum, sendo ainda considerada uma tecnologia emergente, a bio-ventilação também pode ser utilizada para promover a bio-degradação anaeróbia (USEPA, 2006a); neste caso, o gás injectado não será o oxigénio mas o azoto e um dador de electrões, como o hidrogénio ou o dióxido de carbono. Em qualquer das situações, o caudal de injeção de gás deve ser o mínimo necessário para estimular a actividade biológica. A bio-ventilação co-metabólica encontra-se numa fase preliminar de investigação.

Na atenuação natural utilizam-se os processos naturais de degradação e de dissipação dos contaminantes, sendo os processos mais vulgares de atenuação a bio-degradação, a dispersão, a volatilização e a adsorção.

A bio-degradação baseia-se na capacidade de os microrganismos metabolizarem os contaminantes. Pode ocorrer em ambiente aeróbio ou anaeróbio, de forma natural (intrínseca) ou assistida com recurso a bio-estimulação (biostimulation) ou a bio-amplificação (bioaugmentation) ou em associação de ambas (Fernandes et al., 2009; Lin et al., 2010; USEPA, 2006b). A bio-degradação em condições anaeróbias tem sofrido grandes desenvolvimentos nos últimos anos. A descloração redutiva por injeção passiva é uma técnica *in situ* que tem vindo a ser utilizada na reabilitação de água e solos contaminados com compostos orgânicos clorados; utiliza um grande número de furos a partir dos quais são injectadas as culturas de microrganismos, os nutrientes e os redutores necessários. Um dos redutores actualmente mais utilizados é óleo vegetal emulsionado (EVO - emulsified vegetable oil) associado a ferro nano-particulado (Suthersan et al., 2005). Na bio-degradação em condições aeróbias os compostos orgânicos são transformados em dióxido de carbono, água e biomassa, enquanto em condições anaeróbias se transformam essencialmente em metano.

A capacidade de bio-degradação intrínseca de um solo depende das populações microbiológicas autóctones, das características físico-químicas dos solos e das condições ambientais presentes na área contaminada. A bio-remediação envolvendo bio-estimulação e/ou bio-amplificação é uma abordagem económica e ecológica que emergiu como tecnologia de bio-remediação muito vantajosa no caso de solos e de água contaminada com metais pesados e/ou com compostos orgânicos (Tyagy et al., 2011). Na bio-estimulação a actividade dos microrganismos endógenos é estimulada através da manipulação das condições ambientais, fornecendo ar, água, nutrientes ou outros compostos cuja existência em quantidades insuficientes pode condicionar a actividade biológica. Na bio-amplificação opera-se adicionando culturas de microrganismos exógenos com comprovada capacidade para degradar os contaminantes em causa (Suthersan et al., 2005; USEPA, 2006b). A bio-degradação assistida pode ser aplicada *in situ* ou *ex situ*. A bio-ventilação e o bio-arastamento *in situ* são técnicas de bio-degradação assistida.

Nas técnicas agrárias e nas eiras biológicas os solos são espalhados em camadas com pequena altura e a actividade dos microrganismos aeróbios é estimulada pela adição de nutrientes e pelo controlo da humidade. No caso das eiras é introduzido oxigénio a partir de uma rede de tubos perfurados colocados na base da eira. Estas técnicas são utilizadas na degradação de compostos orgânicos.

Na fito-remediação usam-se plantas capazes de utilizar o contaminante no seu processo de crescimento, removendo-o, contendo-o ou transformando-o em formas ambientais inócuas.

O sucesso das tecnologias biológicas está muito dependente do crescimento dos microrganismos e, quando se utilizam consórcios de microrganismos degradadores, é ainda necessário que ocorra interação positiva dos diferentes grupos de microrganismos presentes. As bactérias são o grupo de microrganismos mais abundante nos solos. O tipo e a quantidade de microrganismos presentes dependem das características dos solos e dos factores ambientais presentes (Eweis et al., 1999).

O crescimento bacteriano depende de factores ambientais, factores de substrato e factores microbiológicos. Nos factores ambientais incluem-se a humidade, o arejamento, a temperatura, o pH e a disponibilidade de nutrientes. Nos factores de substrato consideram-se as propriedades que podem afectar a bio-degradação, como a toxicidade, a concentração, a solubilidade, a volatilidade e a estrutura química. Nos factores microbiológicos considera-se a existência de microrganismos com capacidade de degradar os contaminantes em causa, a adaptação da população e factores ecológicos (Eweis et al., 1999). Segundo Kuo (1999), para a maioria dos microrganismos podem considerar-se condições ambientais óptimas para que ocorra bio-degradação as sintetizadas na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Condições óptimas para bio-degradação para a maioria dos microrganismos, adaptado de (Kuo, 1999)

Factor Ambiental	Condições Óptimas
Água disponível no solo	25 a 50 %
Oxigénio	<i>Condições Aeróbias:</i> 0,2 mgL ⁻¹ , 10% do volume de ar nos poros <i>Condições Anaeróbias:</i> inferior a 1% do volume de ar nos poros
Potencial Redox	<i>Condições Aeróbias:</i> superior a 200 mV <i>Condições Anaeróbias:</i> inferior a 200 mV
Nutrientes	Carbono : Azoto : Fósforo = 120:10:1
pH	5,5 – 8,5
Temperatura	15 – 45 °C

Tal como representado na Figura 1.9, em sistemas fechados o crescimento bacteriano é caracterizado por quatro fases: fase de latência, fase de crescimento exponencial, fase estacionária e fase de declínio ou morte (Eweis et al., 1999; Vila, 2004).

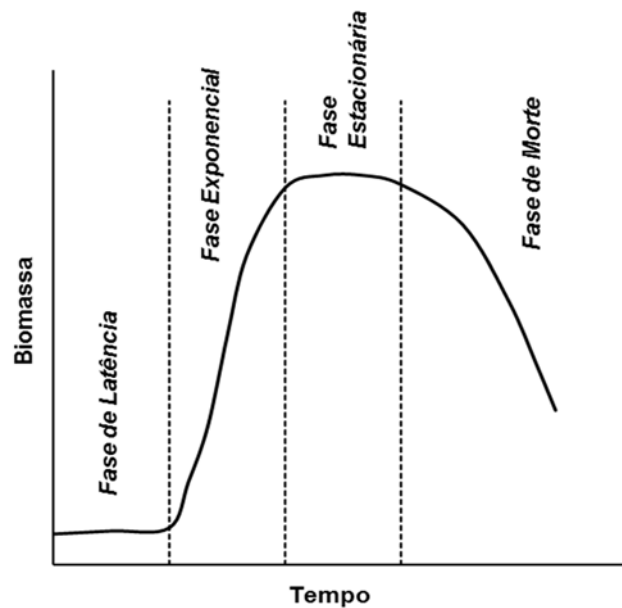


Figura 1.9 – Ciclo de crescimento típico de uma população bacteriana em sistema fechado.
Adaptado de (Eweis et al., 1999)

Na fase de latência os microrganismos adaptam-se ao meio ambiente e ao contaminante, não há crescimento, corresponde ao tempo necessário para activar o metabolismo de degradação dos contaminantes, sintetizando as enzimas necessárias à sua metabolização. Na fase de crescimento exponencial os microrganismos multiplicam-se rapidamente, o aumento do número de microrganismos é normalmente proporcional ao número de indivíduos presentes. Quando surgem factores limitantes, como a falta de nutrientes, a redução de oxigénio, a acumulação de produtos tóxicos e alterações de pH e temperatura, entra-se na fase estacionária, o crescimento não pára mas está muito próximo de zero, a actividade metabólica é muito baixa. Por fim, os microrganismos deixam de crescer e morrem, entram na fase de declínio. O recurso à bio-estimulação permite otimizar esta sequência e melhorar os resultados obtidos.

1.7.4. TECNOLOGIAS TÉRMICAS

As tecnologias térmicas *in situ* têm apresentado, nos últimos anos, um rápido desenvolvimento, revelando potencial no tratamento rápido e profundo de fases líquidas não aquosas (NAPL) (USEPA, 2006a). Incluem-se nestas tecnologias o aquecimento por resistências eléctricas (ERH – electrical resistance heating), a dessorção térmica *in situ* (ISTD – *in situ* thermal desorption / conductive heating), o aquecimento por vapor associado à extracção (SEE – steam enhanced extraction), o aquecimento por radiofrequência (IRA – radio frequency heating) e o aquecimento por injeção de ar quente (hot air injection). Como tecnologia emergente pode destacar-se a STAR (Sustaining Treatment for Active Remediation) (Tanzeer, 2013).

Nestas tecnologias promove-se o aquecimento do solo provocando a dessorção dos contaminantes, redução da sua viscosidade e/ou o aumento da sua pressão de vapor; os contaminantes são vaporizados e transportados mais facilmente, o que favorece a sua remoção.

O aquecimento por injeção de ar quente favorece a remoção de compostos orgânicos por extracção de vapor. Aplica-se com sucesso em locais contaminados com hidrocarbonetos pesados, a sua utilização facilita a remoção de produtos com baixa pressão de vapor.

No aquecimento por resistências eléctricas (ERH – electrical resistance heating) são colocados no solo eléctrodos trifásicos, a resistividade das formações aquece o solo e a água subterrânea até cerca de 100 °C e os contaminantes são removidos por volatilização directa e/ou por arrastamento por vapor. É uma tecnologia rápida, com eficiência demonstrada e pouco perturbadora da superfície; apresenta grande consumo de energia e exige recolha e tratamento da fase gasosa. O seu custo pode ser elevado.

A dessorção térmica *in situ* (ISTD – *in situ* thermal desorption / conductive heating) preconiza a aplicação simultânea de calor e vácuo ao solo a partir de furos de aquecimento e de extracção de vapor. As temperaturas utilizadas são muito elevadas, superiores a 500 °C, pelo que originam oxidação e pirólise do contaminante. Os vapores dos contaminantes gerados no processo são removidos por extracção de vapor ou em trincheiras de recolha. É uma tecnologia que permite o tratamento rápido na fonte, não é afectada por heterogeneidades e destrói o contaminante *in situ*; exige grande quantidade de energia, apresentando, por isso, custos elevados. Durante o processo podem produzir-se subprodutos tóxicos.

No STAR (Sustaining Treatment for Active Remediation) é utilizada a energia dos contaminantes para implementar reacções de combustão sem chama (smoldering combustion). As temperaturas utilizadas são muitíssimo elevadas, superiores a 800 °C, provocando a destruição dos contaminantes. Permite um tratamento rápido na fonte e destruição local do contaminante, apresenta baixas necessidades energéticas e permite alvos definidos. Como limitações salienta-se a possibilidade de afectar as propriedades geotécnicas dos solos e a necessidade de recolher e tratar vapores.

1.8. RESPIROMETRIA

Respirometria é um termo genérico que engloba algumas técnicas instrumentais para medição da actividade metabólica dos seres vivos (animais, plantas, microrganismos, tecidos ou células). O seu campo de aplicação é muito variado, havendo exemplos na área da biologia, da biotecnologia, da agronomia e da medicina, entre outros. A actividade biológica de um ser vivo aeróbio pode ser estimada a partir da determinação da produção de dióxido de carbono e do consumo de oxigénio. Nos estudos de reabilitação de solos contaminados com compostos

orgânicos, a respirometria permite avaliar a cinética de bio-degradação e os factores que afectam o processo; havendo estudos que revelam que os ensaios de respirometria, com determinação das concentrações em oxigénio e dióxido de carbono e da temperatura na atmosfera circundante da amostra de solo contaminado, apresentam elevado potencial no estudo do processo (Vila, 2004).

A respirometria pode ser utilizada em sistema fechado ou em sistema aberto. Quando utilizada em sistema aberto, na monitorização da bio-reabilitação de solos contaminados, por exemplo na bio-ventilação, o caudal utilizado deve ser suficientemente elevado para garantir que o ambiente tem oxigénio necessário à actividade dos microrganismos e suficientemente baixo para permitir controlar as variações na concentração de oxigénio e de dióxido de carbono.

Os equipamentos utilizados na respirometria chamam-se respirómetros, e no caso da monitorização da actividade biológica de organismos aeróbios, são dotados de analisadores de oxigénio e de dióxido de carbono. Existem no mercado diferentes tipos de respirómetros e diferentes tipos de analisadores. No caso do dióxido de carbono, os analisadores são normalmente células de infravermelhos, baseando-se no facto de o dióxido de carbono absorver a luz infravermelha, a concentração de dióxido de carbono é medida electro-opticamente por absorção do comprimento de onda na região do infravermelho (ILT, 2013). No caso do oxigénio, os analisadores podem ser de vários tipos, designadamente células electroquímicas, transdutores paramagnéticos, polarográficos (tipo Clark), galvânicos ou tubos de zircónio (Servomex, 2013).

1.9. SOLOS SELECCIONADOS

A selecção dos solos a utilizar num trabalho de investigação no âmbito da remediação de solos contaminados adquire particular importância uma vez que, por um lado, se pretende que os estudos sejam representativos de uma determinada realidade e, por outro lado, que as suas propriedades físicas, químicas e geotécnicas possibilitem a aplicação com sucesso das tecnologias em estudo.

No presente trabalho pretende-se realizar uma avaliação sistemática, não direccionada para qualquer caso concreto, pelo que foram seleccionados para substrato três solos naturais não contaminados: um solo granítico, um solo xistoso e um solo calcário. Os materiais escolhidos representam três unidades geológicas cuja ocorrência no território português é muito importante:

- i) o granito que é uma rocha magmática intrusiva muito abundante no Minho, Douro Litoral, e Beira Alta, encontrando-se ainda em retalhos importantes na Beira Baixa e no Alentejo;

- ii) o calcário que é uma rocha sedimentar carbonatada que se encontra, predominante, nas Orlas Ocidental (Beira Litoral e Estremadura) e Sul (Algarve);
- iii) o xisto que é rocha metamórfica que, embora em diferentes variedades, ocorre em áreas importantes espalhadas por todo o país, predominantemente em Trás-os-Montes e Alto Douro, Beira Baixa e Alentejo.

Para além destes três solos foi ainda utilizado um quarto solo, recolhido de uma zona contaminada com hidrocarbonetos petrolíferos, para extracção do consórcio de microrganismos bio-degradadores aplicados nos ensaios.

1.10. CONTAMINANTES SELECCIONADOS

Nos solos contaminados podem encontrar-se compostos orgânicos e/ou compostos inorgânicos.

São compostos orgânicos os que têm na sua constituição carbono e hidrogénio, onde se incluem os compostos orgânicos voláteis não halogenados (VOCs), os compostos orgânicos voláteis halogenados (X-VOCs), os compostos orgânicos semivoláteis não halogenados (SVOCs), os compostos orgânicos semivoláteis halogenados (X-SVOCs), as dioxinas e os furanos.

Nos compostos inorgânicos inclui-se uma grande variedade de produtos com destaque para os metais pesados e para as substâncias radioactivos.

Os contaminantes seleccionados para realizar o presente trabalho foram o benzeno, o tolueno, o etilbenzeno e o xileno, vulgarmente designados por BTEX. São hidrocarbonetos voláteis não halogenados, frequentemente encontrados nos solos contaminados, tanto na Europa (EEA, 2010) como nos Estados Unidos da América (USEPA, 2007).

Os BTEX são constituintes naturais do petróleo e são produtos químicos muito utilizados. São constituintes da maioria dos combustíveis (gasolina, gasóleo e jet fuel) e frequentemente aplicados como solventes ou como produtos químicos intermédios em processos industriais. A intensa utilização destes compostos químicos, quer individual quer conjuntamente, acarreta grandes riscos de contaminação ambiental uma vez que a maioria dos derrames ocorrem associados à trasfega, transporte e armazenamento destes produtos. A contaminação do subsolo por derrames ou fuga a partir de tanques de armazenamento subterrâneo é usual em todo o mundo industrializado e cria problemas ambientais que normalmente exigem a posterior aplicação de medidas correctivas (Kuo, 1999).

Quando derramados nos solos, os BTEX têm tendência a deslocar-se através da zona não saturada até à zona saturada, acumulando-se no lençol freático; como apresentam baixa solubilidade em água e densidade inferior à da água, tendem a formar uma fase líquida não

aquosa (NAPL) no topo do lençol freático. As suas características físicas e químicas conferem-lhes elevada a média mobilidade nos solos, propensão para serem facilmente lixiviados e baixa tendência para serem adsorvidos pela matéria orgânica (Morgan et al., 2009b; Morgan et al., 2009c; Morgan et al., 2009a; Róisín De Búrca et al., 2009).

1.10.1. BENZENO

O benzeno que ocorre no meio ambiente tem origem natural e industrial, no entanto as fontes antropogénicas são francamente predominantes. O benzeno está no “Top 20” dos produtos químicos mais produzidos nos Estados Unidos da América (ATSDR, 2007a).

O benzeno é um hidrocarboneto aromático que em estado puro é um líquido transparente e incolor, com odor doce, volátil à temperatura ambiente e pressão atmosférica, ligeiramente solúvel em água e facilmente miscível com a maior parte dos solventes orgânicos (ATSDR, 2007a; Morgan et al., 2009a). Na Tabela 1.2 apresenta-se uma síntese das principais propriedades do benzeno.

Tabela 1.2 - Propriedades físicas e químicas do benzeno (ATSDR, 2007a; Morgan et al., 2009a; Suthersan et al., 2005)

Benzeno			
Fórmula Química	C ₆ H ₆	Ponto de Ebulição (°C)	80,1
Estado Físico	Líquido	Pressão de Vapor a 25 °C (mm Hg)	95,2
Aparência	Incolor	Solubilidade na água a 25 °C (mg L⁻¹)	1800
Odor	Doce	Constante da Lei de Henry a 25 °C (atm.m³mol⁻¹)	5,48 × 10 ⁻³
Massa Molecular (g mol⁻¹)	78,11	Log K_{ow} (a)	2,13
Densidade a 15 °C	0,8787	Log K_{co} (b)	1,8 – 1,92

(a) Coeficiente de partilha octanol – água; (b) Coeficiente de partilha de carbono orgânico

O benzeno é utilizado em todo o mundo, em quantidades enormes, como aditivo para gasolina (1 a 2 %), como solvente nas indústrias química e farmacêutica e principalmente como matéria-prima e produto químico intermédio na produção de outros produtos químicos (ATSDR, 2007a; Morgan et al., 2009a). As principais fontes de benzeno nos solos são as descargas industriais, o depósito e a eliminação de resíduos, os derrames a partir dos tanques de armazenamento subterrâneo de combustíveis e inadequada manipulação. O benzeno foi detectado em pelo menos 1000 dos 1684 locais com resíduos perigosos indicados pela EPA-

National Priorities List (ATSDR, 2007a). As suas características físicas e químicas conferem-lhe elevada mobilidade nos solos e facilidade de volatilização para a atmosfera.

Segundo a UK Environment Agency, os sistemas sanguíneo e imunológico são os principais alvos da exposição crónica ao benzeno (Hopkins et al., 2009a). Na Tabela 1.3 apresenta-se uma síntese da informação existente sobre os efeitos do benzeno na saúde do Homem e dos animais.

Tabela 1.3 – Efeitos do benzeno na saúde do Homem e dos Animais (ATSDR, 2007a)

Benzeno										
Risco na Saúde dos Humanos										
Tipode Contacto	Morte	Sistémico			Imunológico	Neurológico	Reprodutivo	Desenvolvimento	Genotóxico	Cancro
		Agudo	Intermédio	Crónico						
Inalação	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Oral	•	•	•			•				•
Dérmico	•	•								
Risco na Saúde dos Animais										
Inalação	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Oral	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Dérmico		•	•							•

O valor guia (guideline value) para o benzeno nos solos, considerando o risco de exposição de crianças e o tipo de ocupação ou utilização, aponta, segundo a UK Environmental Agency (Jeffries et al., 2009; Morgan et al., 2009a), para os valores apresentados na Tabela 1.4.

Tabela 1.4 – Valor guia para o benzeno (Jeffries et al., 2009; Morgan et al., 2009a)

Tipo de Utilização	Valores Guia (mg de benzeno / kg de solo seco)
Residencial	0,33
Agrícola	0,07
Comercial	95

O benzeno é susceptível de ser bio-degradado tanto em condições aeróbias como anaeróbias (ATSDR, 2007a). Com base em estudos de degradação do benzeno em água, a ECB (European Chemicals Bureau) propõe uma semivida de trinta dias para o benzeno no solo (Morgan et al., 2009a).

1.10.2. TOLUENO

O tolueno é um hidrocarboneto aromático de odor doce, semelhante ao do benzeno; puro, é um líquido incolor, volátil, inflamável e explosivo. Apresenta solubilidade em água moderada mas é miscível com bastantes compostos orgânicos (ATSDR, 2000). Na Tabela 1.5 apresenta-se uma síntese das suas principais propriedades.

Tabela 1.5 - Propriedades físicas e químicas do tolueno (ATSDR, 2000; Róisín De Búrca et al., 2009; Suthersan et al., 2005)

Tolueno			
Fórmula Química	C ₆ H ₅ -CH ₃	Ponto de Ebulição (°C)	110,6
Estado Físico	Líquido	Pressão de Vapor a 25 °C (mm Hg)	28,4
Aparência	Incolor	Solubilidade na água a 25 °C (mg L⁻¹)	490
Odor	Doce	Constante da Lei de Henry a 25 °C (atm.m³mol⁻¹)	6,74 × 10 ⁻³
Massa Molecular (g mol⁻¹)	92,14	Log K_{ow} (a)	2,72
Densidade a 15 °C	0,8669	Log K_{co} (b)	2,06 - 2,31

(a) Coeficiente de partilha octanol – água; (b) Coeficiente de partilha de carbono orgânico

As libertações ambientais do tolueno ocorrem frequentemente associadas aos incêndios florestais, estando também presente em baixa concentração no petróleo (Róisín De Búrca et al., 2009). É um produto químico importante com vasta utilização em todo o mundo. A sua maior aplicação é como aditivo da gasolina (ATSDR, 2000), sendo também usado como matéria-prima no fabrico de outros produtos químicos e ainda como solvente em muitas indústrias (Róisín De Búrca et al., 2009). O tolueno encontrado nos solos tem, quase sempre, origem antropogénica; elevadas concentrações no solo são normalmente resultantes de fugas ou derrames (Hopkins et al., 2009b). À semelhança do benzeno, o tolueno derramado nos solos tende a deslocar-se através da zona não saturada até à zona saturada, acumulando-se no topo de lençol freático (Hopkins et al., 2009b). Devido às suas características físicas e químicas, o tolueno pode facilmente volatilizar-se da superfície do solo para a atmosfera; no entanto, o seu grau de volatilização decresce rapidamente com a profundidade da contaminação.

Segundo a UK Environment Agency, o sistema nervoso é a parte do organismo humano mais afectada pela exposição crónica ao tolueno (Hopkins et al., 2009b). Na Tabela 1.6 apresenta-se uma síntese da informação existente sobre os efeitos do tolueno na saúde do Homem e dos animais.

Tabela 1.6 – Efeitos do tolueno na saúde do Homem e dos Animais (ATSDR, 2000)

Tolueno										
Risco na Saúde dos Humanos										
Tipode Contacto	Morte	Sistémico			Imunológico	Neurológico	Reprodutivo	Desenvolvimento	Genotóxico	Cancro
		Agudo	Intermédio	Crónico						
Inalação	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Oral		•								
Dérmico		•							•	
Risco na Saúde dos Animais										
Inalação	•	•	•	•	•	•	•	•		•
Oral	•	•	•		•	•	•	•	•	
Dérmico		•	•							•

O valor guia (guideline value) para o tolueno nos solos, considerando o risco de exposição de crianças e o tipo de ocupação ou utilização, aponta, segundo a UK Environmental Agency (Jeffries et al., 2009), para os valores apresentados na Tabela 1.7.

Tabela 1.7 – Valor guia para o tolueno (Jeffries et al., 2009; Róisín De Búrca et al., 2009)

Tipo de Utilização	Valores Guia (mg de tolueno / kg de solo seco)
Residencial	610
Agrícola	120
Comercial	4400

O tolueno é susceptível de ser bio-degradado tanto em condições aeróbias como anaeróbias (Róisín De Búrca et al., 2009). Os estudos de bio-degradação do tolueno no solo apontam para semivida de um a sete dias (ATSDR, 2000).

1.10.3. ETILBENZENO

O etilbenzeno é um hidrocarboneto aromático de odor doce; puro, é um líquido incolor e inflamável (ATSDR, 2010). Apresenta baixa solubilidade em água mas é miscível com outros compostos orgânicos. Na Tabela 1.8 apresenta-se uma síntese das suas principais propriedades.

Tabela 1.8 - Propriedades físicas e químicas do etilbenzeno (ATSDR, 2010; Morgan et al., 2009b; Suthersan et al., 2005)

Etilbenzeno			
Fórmula Química	$C_6H_5 - C_2H_5$	Ponto de Ebulição ($^{\circ}C$)	136,2
Estado Físico	Líquido	Pressão de Vapor a 25 $^{\circ}C$ (mm Hg)	9,53
Aparência	Incolor	Solubilidade na água a 25 $^{\circ}C$ (mg L$^{-1}$)	152
Odor	Doce	Constante da Lei de Henry a 25 $^{\circ}C$ (atm.m3mol$^{-1}$)	$8,68 \times 10^{-3}$
Massa Molecular (g mol$^{-1}$)	106,17	Log K$_{ow}$ (a)	3,15 - 4,34
Densidade a 15 $^{\circ}C$	0,8671	Log K$_{co}$ (b)	1,98 - 2,65

(a) Coeficiente de partilha octanol – água; (b) Coeficiente de partilha de carbono orgânico

O etilbenzeno ocorre naturalmente no petróleo e as suas libertações ambientais estão, frequentemente, associadas à combustão de biomassa. As fontes antropogénicas são, no entanto, mais importantes do que as naturais. O etilbenzeno está no “Top 50” dos produtos químicos mais produzidos nos Estados Unidos da América (ATSDR, 2010) e estima-se que na União Europeia sejam produzidas cerca de 5,28 milhões de toneladas por ano (Morgan et al., 2009b). Cerca de 95 a 99 % do volume produzido é utilizado no fabrico de estireno, sendo o restante utilizado como produto químico intermédio, como solvente e como constituinte do asfalto, da nafta e dos combustíveis petrolíferos (Morgan et al., 2009b).

Segundo dados da EPA, o etilbenzeno foi encontrado em 829 locais com resíduos perigosos (ATSDR, 2010). As principais fontes de contaminação são as fugas de gasolina e outros combustíveis, a eliminação de solventes em ambiente industrial e ainda através da lixiviação de aterros ou resíduos industriais contaminados. À semelhança do benzeno e do tolueno, o etilbenzeno derramado nos solos, tende a deslocar-se através da zona não saturada até à zona saturada, acumulando-se no lençol freático (Morgan et al., 2009b).

Segundo a UK Environment Agency, o fígado e os rins são os principais órgãos afectados pela exposição ao etilbenzeno (Morgan et al., 2009b). Na Tabela 1.9 apresenta-se uma síntese da informação existente sobre os efeitos do etilbenzeno na saúde do Homem e dos animais.

Tabela 1.9 – Efeitos do etilbenzeno na saúde do Homem e dos Animais (ATSDR, 2010)

Etilbenzeno										
Risco na Saúde dos Humanos										
Tipode Contacto	Morte	Sistêmico			Imunológico	Neurológico	Reprodutivo	Desenvolvimento	Genotóxico	Cancro
		Agudo	Intermédio	Crónico						
Inalação		•		•		•				•
Oral										
Dérmico										
Risco na Saúde dos Animais										
Inalação	•	•	•			•	•	•		
Oral	•		•			•	•			•
Dérmico	•	•								

O valor guia (guideline value) para o etilbenzeno nos solos, considerando o risco de exposição de crianças e o tipo de ocupação ou utilização, aponta, segundo a Environmental Agency (Morgan et al., 2009b), para os valores apresentados na Tabela 1.10.

Tabela 1.10 – Valor guia para o etilbenzeno (Jeffries et al., 2009; Morgan et al., 2009b)

Tipo de Utilização	Valores Guia (mg de etilbenzeno / kg de solo seco)
Residencial	350
Agrícola	90
Comercial	2800

À semelhança do benzeno e do tolueno, o etilbenzeno é susceptível de ser bio-degradado tanto em condições aeróbias como anaeróbias. Os estudos de bio-degradação aeróbia de etilbenzeno, considerando cinéticas de 1ª ordem, apontam para semivida de três a dez dias (Morgan et al., 2009b).

1.10.4. XILENO

O xileno é um hidrocarboneto aromático de odor doce, apresenta-se como um líquido incolor, inflamável com baixa solubilidade em água. Pode ser encontrado sob a forma de três isómeros

(orto-xileno, meta-xileno e para-xileno), dependendo da localização do grupo metilo no anel benzênico. A Tabela 1.11 apresenta uma síntese das principais propriedades físicas e químicas dos três isômeros de xileno e de uma mistura.

Tabela 1.11 - Propriedades físicas e químicas do xileno (ATSDR, 2007b; Morgan et al., 2009c)

	Orto-xileno	Meta-xileno	Para-xileno	Mistura de Xilenos
Fórmula Química	1,2(CH ₃) ₂ -C ₆ H ₄	1,3(CH ₃) ₂ -C ₆ H ₄	1,4(CH ₃) ₂ -C ₆ H ₄	(CH ₃) ₂ -C ₆ H ₄
Estado Físico	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido
Aparência	Incolor	Incolor	Incolor	Límpido
Odor	Doce	Doce	Doce	Doce
Massa Molecular (g mol⁻¹)	106,16	106,16	106,16	106,16
Densidade a 15 °C	0,880	0,864	0,8611	0,864
Ponto de Ebulição (°C)	144,5	139,1	138,4	137 - 140
Pressão de Vapor a 25 °C (mm Hg)	6,61	8,29	8,84	6,72
Solubilidade na água a 25 °C (mg L⁻¹)	178	161	162	106
Constante da Lei de Henry a 25 °C (atm.m³mol⁻¹)	5,18×10 ⁻³	7,18×10 ⁻³	6,90×10 ⁻³	----
Log K_{ow} (a)	3,12	3,2	3,15	----
Log K_{co} (b)	2,11 – 2,63	2,22 – 2,69	2,31 – 2,65	----

(a) Coeficiente de partilha octanol – água; (b) Coeficiente de partilha de carbono orgânico

As misturas comerciais de xileno apresentam constituição variada; uma mistura de xilenos produzida a partir de petróleo apresenta cerca de 25 % de o-xileno, 50 % de m-xileno e 25 % de p-xileno (Morgan et al., 2009c). A maior parte do xileno produzido destina-se a aditivo em combustíveis, sendo ainda utilizado como solvente e no fabrico de perfumes, pesticidas, produtos farmacêuticos, borracha e plásticos (Morgan et al., 2009c). O xileno encontrado nos solos é maioritariamente antropogénico, tem origem em derrames e fugas, podendo também ocorrer como produto resultante da degradação de hidrocarbonetos complexos (Morgan et al., 2009c)

O xileno é um composto tóxico, pode causar inconsciência ou mesmo morte, é inflamável e evapora rapidamente, sendo facilmente absorvido quer pelos pulmões quer por contacto

dérmico (WHO, 2000). O sistema nervoso central é o principal órgão afectado pela exposição ao xileno (Morgan et al., 2009c). Na Tabela 1.12 apresenta-se uma síntese da informação existente sobre os efeitos do xileno na saúde do Homem e dos animais.

Tabela 1.12 – Efeitos do xileno na saúde do Homem e dos Animais (ATSDR, 2007b)

Xileno										
Risco na Saúde dos Humanos										
Tipode Contacto	Morte	Sistémico			Imunológico	Neurológico	Reprodutivo	Desenvolvimento	Genotóxico	Cancro
		Agudo	Intermédio	Crónico						
Inalação	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Oral	•	•								
Dérmico		•	•	•	•	•	•			•
Risco na Saúde dos Animais										
Inalação	•	•	•	•		•	•	•	•	
Oral	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Dérmico	•	•	•					•		•

O valor guia (guideline value) para o xileno nos solos, considerando o risco de exposição de crianças e o tipo de ocupação/utilização, aponta, segundo a UK Environmental Agency (Morgan et al., 2009c), para os valores apresentados na Tabela 1.13.

Tabela 1.13 – Valor guia para o xileno (Jeffries et al., 2009; Morgan et al., 2009c)

Tipo de Utilização	Valores Guia (mg de etilbenzeno / kg de solo seco)		
	m-xileno	o-xileno	p-xileno
Residencial	240	250	230
Agrícola	180	160	160
Comercial	3500	2600	3200

O xileno é susceptível de ser bio-degradado tanto em condições aeróbias como anaeróbias, o m-xileno e o p-xileno são mais facilmente bio-degradados, sendo o o-xileno mais persistente (Morgan et al., 2009c). Considerando cinéticas de bio-degradação de 1ª ordem, os valores de

semivida para o xileno em condições aeróbias variam entre sete e vinte e oito dias (Morgan et al., 2009a).

1.11. TECNOLOGIAS DE REABILITAÇÃO DE SOLOS SELECCIONADAS

O tratamento de solos contaminados com hidrocarbonetos petrolíferos pode realizar-se com recurso a várias tecnologias de remediação. As tecnologias disponíveis podem ser utilizadas individualmente, em conjunto ou consecutivamente. A extracção de vapor é uma das tecnologias mais utilizadas na remediação de solos insaturados contaminados com produtos orgânicos voláteis (VOCs) (Albergaria et al., 2008); no entanto, torna-se pouco eficaz quando os níveis de contaminação são baixos ou quando os contaminantes orgânicos não voláteis (NVOCs) estão presentes (Malina et al., 2002). Os processos biológicos de descontaminação têm adquirido importância mundial, especialmente no tratamento de solos contaminados com compostos orgânicos (USEPA, 2007, 2010). São métodos inócuos, com baixo custo e de fácil aplicação a grande escala (Margesin et al., 2000). Existem várias bactérias e fungos com capacidade para oxidar os produtos petrolíferos; os que se desenvolveram na presença de hidrocarbonetos apresentam maior aptidão para este tipo de catabolismo (Vila, 2004). A maioria dos constituintes do petróleo são biodegradáveis em condições aeróbicas, são necessárias 3 a 3,5 g de oxigénio para a completa mineralização de 1 g de hidrocarbonetos petrolíferos (Suthersan et al., 2005).

A bio-ventilação é frequentemente considerada como a tecnologia biológica mais adequada ao tratamento da zona não saturada dos solos (USEPA, 2006b). No presente trabalho, foram seleccionadas para o estudo, tecnologias de bio-degradação assistida. Realizaram-se ensaios de bio-remediação envolvendo bio-amplificação e bio-estimulação, não ventilada e com ventilação. Os ensaios não ventilados serão designados por ensaios de bio-remediação e os ensaios realizados com ventilação serão designados por ensaios de bio-ventilação. Como já foi referido anteriormente, a eficiência destas tecnologias é muito dependente da capacidade dos microrganismos degradadores se multiplicarem e se manterem vivos no ambiente natural, o que é fortemente condicionado por vários factores ambientais, dos quais se destacam a população de microrganismos, a disponibilidade de nutrientes e de oxigénio, o pH, a temperatura e o teor em água dos solos, a qualidade e quantidade dos contaminantes e as propriedades físicas, químicas e geotécnicas dos solos (Margesin et al., 2000).

Quando se utilizam tecnologias de bio-remediação, a monitorização da actividade biológica assume especial relevância; em laboratório, a quantificação da biomassa é normalmente realizada quer directa, quer indirectamente. Directamente, realiza-se por contagem das células viáveis (CFU - unidades formadoras de colónias), pelo método da contagem de colónias em placas ou por contagem do número de células totais, quer em microscopia quer utilizando câmaras de contagem. Indirectamente, realiza-se por análise espectrofotométrica com recurso ao método turbidimétrico (Madigan et al., 2009). Em obra, quando a monitorização do

processo de bio-degradação é permanentemente necessária, estes métodos revelam-se, por si só, insuficientes e temporalmente inadequados. Neste caso, a análise respirométrica dos ensaios, associada à contagem de colónias em placas, é um método expedito de monitorização da actividade biológica nos solos, em que as concentrações de oxigénio e de dióxido de carbono são registadas durante todo o processo de bio-remediação aeróbia.

A bio-ventilação aeróbica não é uma tecnologia de remediação *in situ* recente, apresentando longo historial de utilização na remediação de solos contaminados com produtos petrolíferos (USEPA, 2006b). Estudos realizados, pela USEPA e pela United States Air Force, provaram tratar-se de uma tecnologia económica e eficaz no tratamento de solos insaturados contaminados com hidrocarbonetos petrolíferos (USEPA, 2006a). Nesta tecnologia é combinada a extracção de vapor com bio-degradação, utilizando-se um fluxo de ar, para potenciar a bio-degradação de todos os compostos orgânicos (voláteis, semivoláteis e não voláteis) adsorvidos na zona de infiltração do solo (Fiúza, 2009b; Malina et al., 2002; Shewfelt et al., 2005; Sui et al., 2005). Comparando com a extracção de vapor, os débitos de ar utilizados na bio-ventilação são muito reduzidos, o que minimiza a volatilização e, consequentemente, a necessidade de tratamento dos gases de exaustão (Fiúza, 2009b; Sui et al., 2005). Comparando com a bio-degradação não assistida, a principal vantagem reside na sustentação e aumento da actividade biológica, por fornecimento do suplemento de oxigénio; o tempo de remediação diminui e a vida média dos microrganismos aumenta (Abu-El-Sha'r et al., 2005; Osterreicher-Cunha et al., 2004). Na Figura 1.10 é apresentado um sistema típico de implementação *in situ* de bio-ventilação aeróbia. O conhecimento da permeabilidade do solo, da bio-degradabilidade dos contaminantes, da difusão e distribuição dos contaminantes, do teor em água do solo, do pH, da temperatura e da disponibilidade de receptores de electrões é indispensável para decidir da aplicabilidade da bio-ventilação (USEPA, 2006a). A permeabilidade do solo condiciona a remoção dos contaminantes na fase gasosa e determina a velocidade a que o oxigénio pode ser fornecido aos microrganismos; a biodegradabilidade dos contaminantes determina a velocidade a que estes podem ser metabolizados pelos microrganismos (Fiúza, 2009b); o teor em água do solo, o pH, a temperatura e a disponibilidade de receptores de electrões condicionam a actividade biológica dos microrganismos.

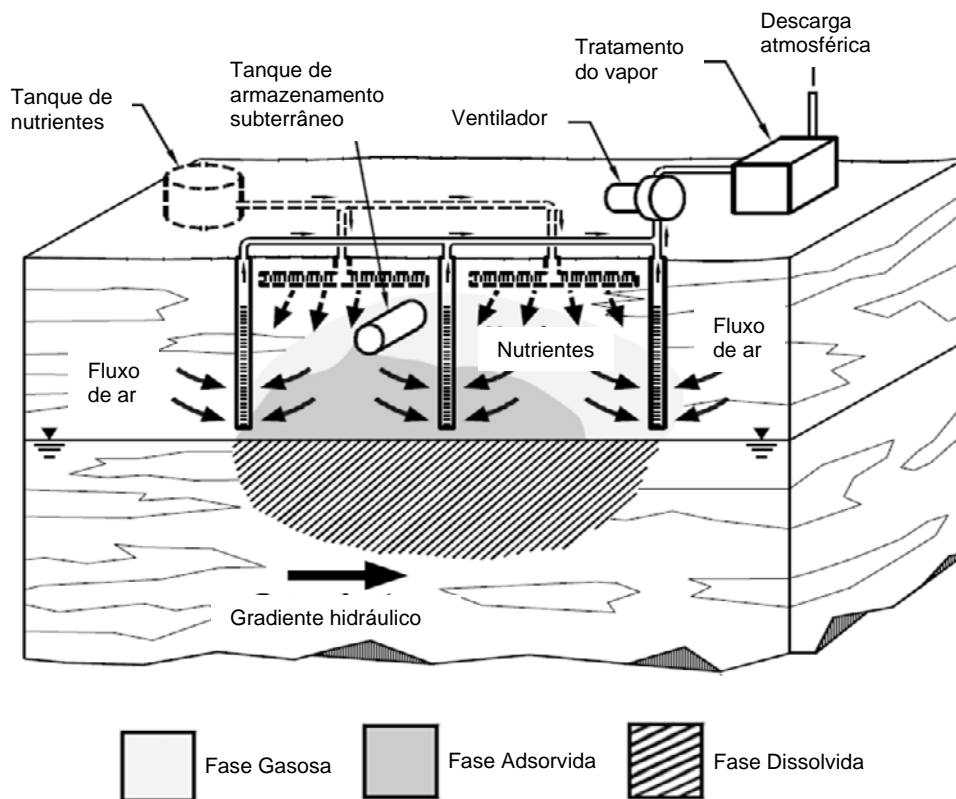


Figura 1.10 – Representação esquemática de um sistema típico de implementação *in situ* de bio-ventilação aeróbia. Adaptado de (USEPA, 1994)

A bio-ventilação pode igualmente ser utilizada no tratamento de contaminações com solventes não halogenados (benzeno, acetona, tolueno e fenol), com solventes ligeiramente halogenados (dicloroetano, diclorometano e clorobenzeno), com SVOCs e com alguns hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) (Downey et al., 2004; USEPA, 2006a). Na Figura 1.11, representam-se, função da sua solubilidade em água e pressão de vapor, os principais constituintes da gasolina, do jet-fuel e do gasóleo e os domínios de aplicação da extracção de vapor e da bio-ventilação; como se pode verificar os BTEX são contaminantes passíveis de serem removidos quer por ventilação quer por bio-ventilação.

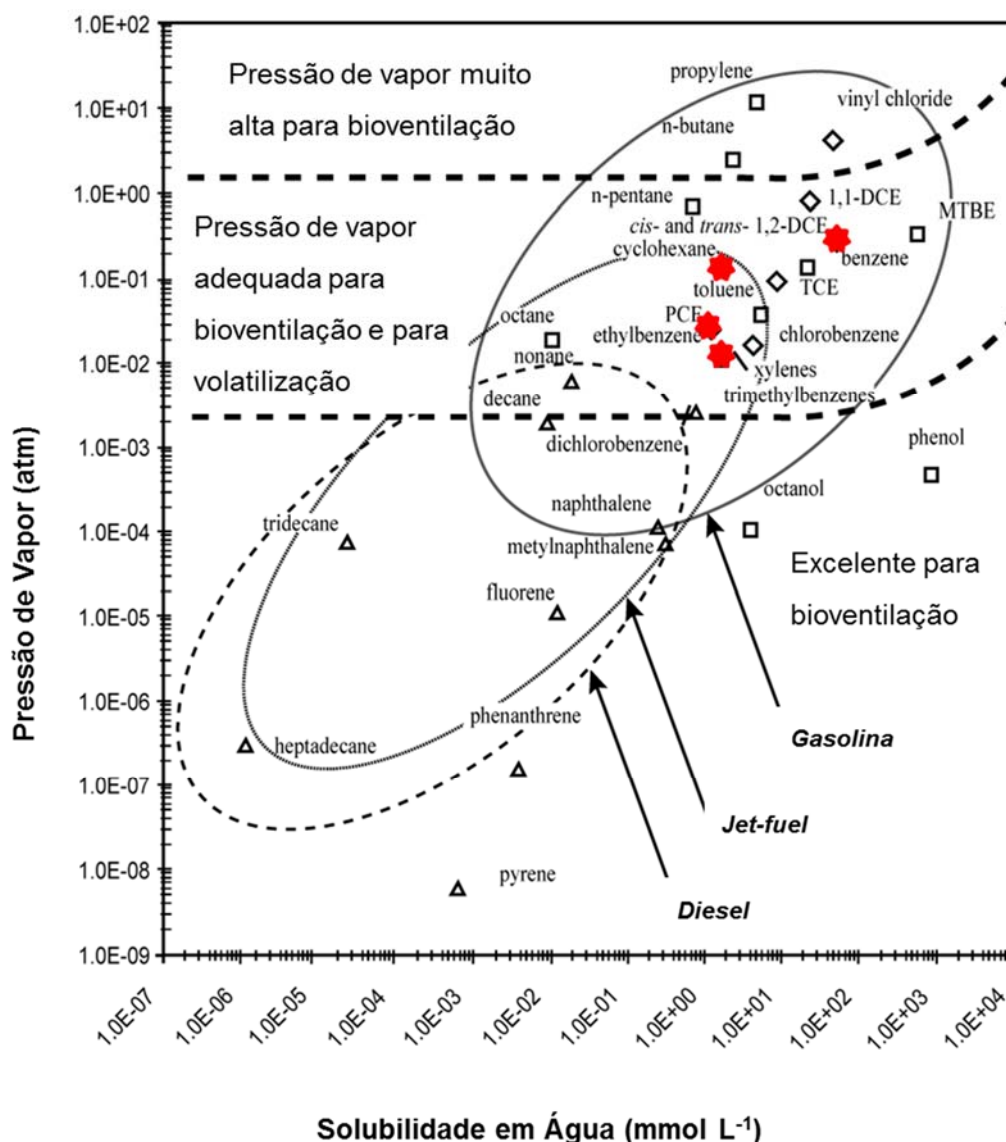


Figura 1.11 - Principais constituintes da gasolina, do jet-fuel e do gasóleo e os domínios de aplicação da extracção de vapor e da bio-ventilação (Downey et al., 2004).

1.12. MICRORGANISMOS SELECCIONADOS

A escolha dos microrganismos a utilizar nos ensaios de bio-remediação de solos é um aspecto relevante nos estudos de remediação utilizando tecnologias biológicas. Há muito que se sabe que os fungos, os actinomicetes e diferentes espécies de *Pseudomonas* são capazes de degradar baixas concentrações de BTEX (Gardin et al., 1999). Sabe-se, no entanto, que os consórcios de microrganismos apresentam maior potencial degradador do que as espécies isoladas (Fernandes et al., 2009; Gardin et al., 1999).

A existência de actividade biológica nos solos depende da presença de organismos com capacidade para fixar azoto e dióxido de carbono, utilizando a luz solar como fonte de energia. Os solos utilizados neste trabalho como substrato foram obtidos abaixo do coberto vegetal, em zonas não contaminadas, pouco expostas à luz e possuem reduzido conteúdo em microrganismos. Optou-se, então, por utilizar um consórcio de microrganismos aeróbios extraído de solos contaminados com compostos orgânicos obtidos na bacia de retenção de um tanque de armazenamento de crude de uma refinaria. Após extracção, o consórcio microbiano foi desenvolvido em meio mineral líquido rico em nutrientes, vindo a constituir o inóculo utilizado na bio-amplificação nos ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação. A utilização de um consórcio de microrganismos degradadores pressupõe interacção positiva dos diferentes grupos de microrganismos presentes e da capacidade de crescimento do consórcio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. MATERIAIS

2.1.1. REACTORES

Os ensaios em meio líquido e de bio-remediação em frasco e as isotérmicas de equilíbrio foram realizados em frascos Erlenmeyer autoclaváveis de 500 mL, 1000 mL e 2000 mL, fechados com válvulas de Teflon (Mininert®, VICI®, AG International). Foram também utilizados frascos Erlenmeyer autoclaváveis de 250 mL com tampa roscada, nas culturas de enriquecimento.

Os ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação em coluna foram realizados em reactores de aço inoxidável com forma cilíndrica, com 10 cm de diâmetro interno e 50 ou 35,5 cm de altura interna. O reactor de 50 cm de altura estava munido de quatro portas de amostragem e/ou de circulação de ar: P1 no topo, P2 a 2/3 da altura na parede lateral, P3 a 1/3 da altura da parede lateral e P4 na base; o reactor de 35,5 cm de altura também possuía 4 portas de amostragem: uma no topo (P1) e 3 na parede lateral P2, P3 e P4, respectivamente a 2/3 da altura, a 1/3 da altura e junto da base.

Na Figura 2.1 são apresentados os reactores e as válvulas Mininert® utilizados.

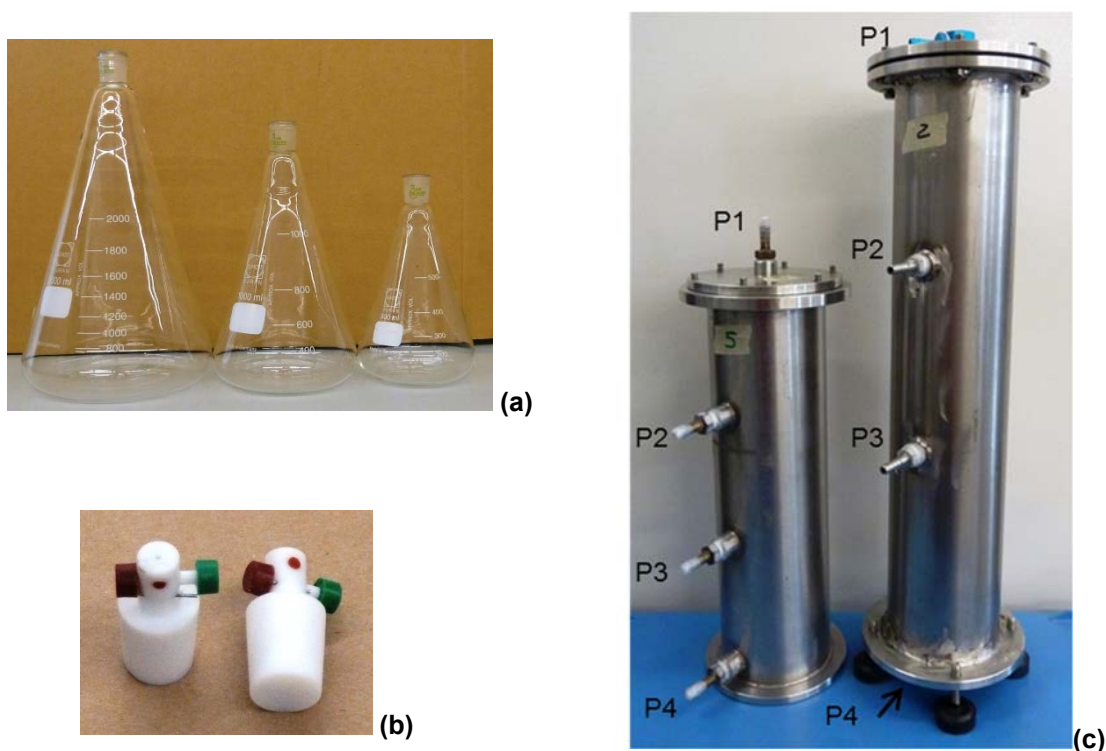


Figura 2.1 – Reactores utilizados. Frascos Erlenmeyer (a) fechados com Válvulas Mininert® (b) e colunas em aço inoxidável com quatro pontos de amostragem (c).

2.1.2. REAGENTES

Os contaminantes utilizados foram benzeno, tolueno e ortoxileno, da marca Panreac Quimica, etilbenzeno, da marca Merk, e xileno (mistura dos três isómeros), da marca Fischer Scientific, todos de qualidade *pró-análise* (p.a.) e grau de pureza maior ou igual a 99,5%. Foi ainda utilizada uma mistura dos contaminantes referidos contendo: benzeno (25 % em volume), tolueno (25 % em volume), etilbenzeno (25 % em volume) e o-xileno (25 % em volume), que passará a ser designada por BTEoX.

O meio mineral líquido (MMA) utilizado nas culturas de microrganismos foi preparado com reagentes químicos da marca Merk, todos de qualidade *pró-análise*, sendo a sua composição química seguidamente apresentada: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (3,8 mmol L⁻¹), KNO_3 (1,02 mmol L⁻¹) e NaNO_3 (8,2 mmol L⁻¹) como fontes de azoto e ainda Na_2HPO_4 (6,0 mmol L⁻¹), KH_2PO_4 (4,0 mmol L⁻¹), $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (0,47 mmol L⁻¹), NaCl (0,14 mmol L⁻¹), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,41 mmol L⁻¹), $\text{N}(\text{CH}_2\text{CO}_2\text{H})_3$ (0,52 mmol L⁻¹), $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (2 mg L⁻¹), $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,1 mg L⁻¹), $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (0,03 mg L⁻¹), H_3BO_3 (0,3 mg L⁻¹), $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,24 mg L⁻¹), $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0,01 mg L⁻¹), $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,02 mg L⁻¹), $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,03 mg L⁻¹), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (0,5 mg L⁻¹) e ácido etilenodiaminotetracético (5 mg L⁻¹) (Vila, 2004).

A solução salina (8,5 g L⁻¹) utilizada nas extracções da população microbiana e nas diluições das culturas foi preparada com NaCl, com qualidade *pró-análise*, da marca Merk.

O meio sólido LB (Lysogeny Broth) utilizado em placas de Petri foi preparado utilizando triptona (10 mg L⁻¹), extrato de levedura (5 mg L⁻¹), agar-agar (20 mg L⁻¹), da marca Liofilchem, todos para uso bacteriológico, e cloreto de sódio (10 mg L⁻¹), com qualidade *pró-análise*, da marca Merk.

Na preparação dos meios, da solução salina e nos ensaios não inoculados foi utilizada água destilada e desmineralizada, da marca Cleffekt, com pH 5,8, resistividade 0,04 MΩ cm e 27 mg L⁻¹ de resíduo seco.

Os meios acima descritos (MMA e LB) e a solução salina foram sempre esterilizados em autoclave (121°C e 1 atm durante 15 a 20 minutos), antes de qualquer aplicação.

2.1.3. EQUIPAMENTOS

No decurso deste trabalho foram utilizados vários equipamentos de laboratório que são apresentados na Tabela 2.1, estando indicado o tipo de equipamento, respectiva marca e modelo.

Tabela 2.1 – Equipamentos utilizados no decurso dos trabalhos

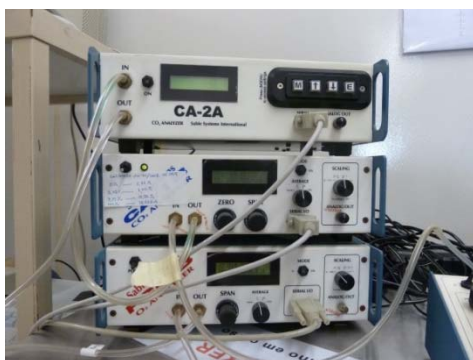
Equipamento	Marca	Modelo
Agitador orbital	Heidolph	Unimax 1010
Autoclaves	All American Panasonic	25X MLS – 3020U
Balança analítica	Chyo	JL-180
Balança semi-analítica	Kern	EW1500-2M
Câmara de fluxo laminar	Biosan	UVC/T-M-AR
Câmaras termostáticas	WTW	TS1006-I e TS606/2-i
Condutivímetro	WTW	Inolab – Cond. 730
Controlador de caudal	AALBORG	GFC17
Cromatógrafo	Shimadzu	GC-2010
Estufa	Binder	FD
Kits de ensaio TPH	Chemetrics	Remediaid test kits
Medidor de pH	WTW	Inolab
Mufla	Lenton Furances	----
Respirómetros (analisador O ₂ e CO ₂)	Sable Systems Sensotec Servomex	TR8 Rapidox 3100 5200 Multipurpose
Digestores (determinação do azoto pelo método Kjeldal)	Tecator Velp Scientifica	Distiling Unit - Dig 2006 DK6
Analisador de carbono TOC	Shimadzu	TOC-VCSN com módulo SSM-5000A
UV-Vis espectrofotómetro	Thermo Cientific	Evolution 300

O cromatógrafo utilizado (Figura 2.2 a) esteve equipado com coluna capilar de modelo TRB-5, com dimensões 30 m × 0,25 mm × 0,25 µm, da marca Teknokroma.

Na Figura 2.2, para além do cromatógrafo e dos respirómetros utilizados (b, c e d), é também apresentado o controlador de caudal (e) utilizado nos ensaios de bio-ventilação, equipamento que permite controlar com precisão caudais compreendidos entre 0 e 20 mL min⁻¹.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 2.2 – Equipamentos utilizados. (a) Cromatógrafo, (b) Respirómetro Sable, (c) Respirómetro Sensotec, (d) Respirómetro Servomex e (e) Controlador de caudal.

Durante todo o trabalho foram utilizadas seringas de 10, 50, 250 e 2500 µL, das marcas Hamilton e ILS, para toma dos contaminantes, tanto na fase líquida como na fase gasosa.

2.2. MÉTODOS

2.2.1. AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO DE SOLOS

Neste trabalho foram utilizados quatro solos, dois naturais (solo contaminado com crude e solo residual granítico) e dois preparados (solo proveniente de calcário margoso e solo proveniente de xisto). Na Figura 2.3 encontram-se assinalados os locais de colheita das amostras e na Tabela 2.2 apresentam-se os dados relativos à sua localização, colheita e tipo de amostra.

Os solos preparados são solos naturais cuja granulometria foi controlada em laboratório de modo a ficar com uma distribuição granulométrica pré-fixada.

O solo contaminado com crude (BSoil) não sofreu qualquer tipo de preparação, encontrava-se armazenado num contentor adequado, à temperatura ambiente e ao abrigo da luz. Este solo foi utilizado nas culturas de enriquecimento para extracção do consórcio microbiano. Devido à longa duração dos trabalhos, foi necessário realizar três campanhas de amostragem, a primeira decorreu em Março de 2009, a segunda em Maio de 2011 e a terceira em Março de 2012.

O solo residual granítico (SR) foi seco ao ar e posteriormente armazenado à temperatura ambiente e ao abrigo da luz. Imediatamente antes dos ensaios, os provetes de solo obtidos por quartilha manual foram secos em estufa a 50°C, durante 72 horas, e arrefecidos em recipientes fechados para garantir um teor em água muito próximo de 0% e semelhante em todos os provetes.

O calcário margoso (CL) e o xisto clorítico (XT) foram secos ao ar, fragmentados e armazenados à temperatura ambiente e ao abrigo da luz. Os materiais assim obtidos foram posteriormente peneirados a seco para separar as diferentes fracções granulométricas a partir das quais se produziram os provetes com composição granulométrica controlada. Os provetes assim preparados foram secos em estufa (50°C durante 72 horas) e arrefecidos em recipientes fechados, imediatamente antes dos ensaios, para garantir um teor em água muito próximo de 0% e semelhante em todos os provetes.

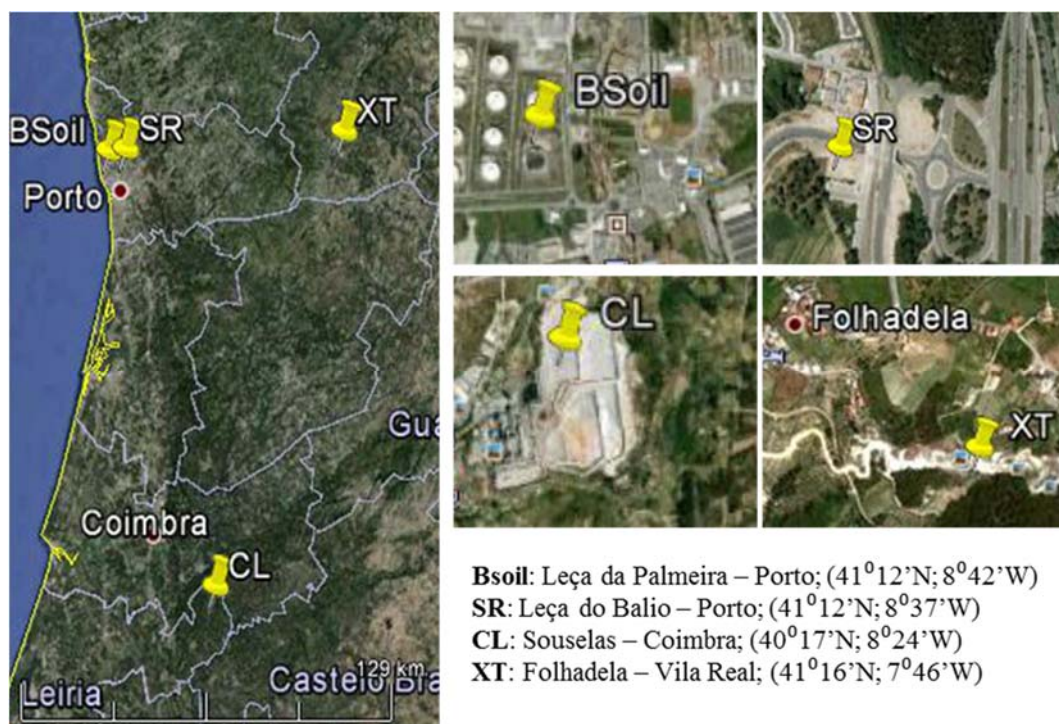


Figura 2.3 – Locais de colheita das amostras. BSoil – solo contaminado com crude (Leça da Palmeira - Porto); SR – solo residual granítico (Leça do Balio - Porto); CL – calcário margoso (Souselas - Coimbra) e XT – xisto clorítico (Folhadela – Vila Real).

Tabela 2.2 – Localização e colheita das amostras de solo

Tipo de Solo	Contaminado com crude	Granítico	Calcário margoso	Xisto
Designação	BSoil	SR	CL	XT
Local de Amostragem	Leça da Palmeira (Porto) (41°12'N; 8°42'W) Bacia de retenção de tanque de armazenamento de crude	Leça do Balio (Porto) (41°12'N; 8°37'W) Escavação recente	Souselas (Coimbra) (40°17'N; 8°24'W) Frente de desmonte de pedreira	Folhadela (Vila Real) (41°16'N; 7°46'W) Escavação recente
Profundidade da Amostra	Superficial	2 a 3 m	----	2 a 5 m
Técnica de Amostragem	Pá metálica	Retroescavadora e pá metálica	Retroescavadora e pá metálica	Retroescavadora e pá metálica
Amostra	Remexida	Remexida	Remexida	Remexida

2.2.2. CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS

Neste trabalho foi feita uma extensa caracterização dos solos, tendo sido determinados os seguintes parâmetros:

- ✓ análise granulométrica por peneiração e sedimentação;
- ✓ limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP);
- ✓ densidade das partículas (G);
- ✓ teor em água (W);
- ✓ coeficiente de permeabilidade (k);
- ✓ massa volúmica (ρ);
- ✓ teor em água de saturação (W_s);
- ✓ pH;
- ✓ condutividade a 25⁰C (σ);
- ✓ carbono total (TC), carbono inorgânico (IC) e carbono orgânico total (TOC);
- ✓ total de hidrocarbonetos petrolíferos (TPH);
- ✓ teores em azoto e fósforo (N e P);
- ✓ elementos maiores (SiO₂, Al₂O₃, Fe, MnO, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, TiO₂ e P₂O₅);
- ✓ composição mineralógica;
- ✓ perda ao rubro e
- ✓ quantificação da população microbiana autóctone.

As características geotécnicas foram determinadas num laboratório exterior, acreditado, de acordo com as normas de ensaios de solos em vigor em Portugal: análise granulométrica segundo a norma LNEC E196/1966, limites de liquidez e de plasticidade de acordo com a norma NP143/1969, densidade das partículas segundo a norma NP83/1965, teor em água de acordo com a norma NP84/1965 e coeficiente de permeabilidade segundo a norma ASTM D 2435/2004).

A massa volúmica (ρ) de um solo está muito dependente da sua composição mineralógica e do seu grau de compactação. Corresponde à razão entre a massa de solo e o seu volume aparente. Neste trabalho o solo foi deixado cair livremente no interior de uma proveta de 250 mL, não sofrendo deste modo qualquer tipo de compactação. Dividindo a massa de solo introduzido na proveta pelo volume da proveta determina-se o peso volúmico do solo.

O teor em água de saturação foi calculado através do volume de vazios do solo e determinado experimentalmente com recurso à metodologia apresentada pelo United States Department of Agriculture (USSLS, 1954). Esta metodologia preconiza a preparação de uma pasta saturada com cerca de 250 g de solo seco, ao qual se vai adicionando água destilada e desmineralizada, à medida que se vai mexendo com uma espátula; considera-se que a pasta de solo está saturada quando a superfície brilha, a pasta flui quando se inclina o recipiente e desliza da espátula. Após a mistura, a pasta fica em repouso durante uma hora, finda a qual se volta a verificar o cumprimento dos critérios supracitados, sendo o teor em água de saturação posteriormente obtido pelo método de secagem em estufa.

As determinações de pH e condutividade do solo foram executadas, com recurso a um medidor de pH e a um condutímetro, na solução sobrenadante obtida após agitação constante durante 15 min e posterior período de repouso de 20 min, da mistura de 20 g de solo com 20 g de água destilada e desmineralizada (Jones, 2001).

As determinações de carbono total (TC) e de carbono inorgânico (IC) realizaram-se com recurso ao equipamento TOC, de acordo com as instruções do equipamento e utilizando um módulo para sólidos. O carbono orgânico total (TOC) foi determinado por diferença entre TC e IC.

A concentração em hidrocarbonetos petrolíferos totais (TPH) foi determinada pelo método colorimétrico, com recurso a “kits” de ensaio da marca Chemetrics.

Os teores em azoto foram determinados pelo método de Kjeldahl. Neste método, a amostra de solo é digerida em presença de ácido sulfúrico concentrado e mineralizada com formação de água e dióxido de carbono; seguidamente, o azoto amoniacal é convertido em amónio, o qual é posteriormente destilado e absorvido numa solução de ácido bórico. Finalmente, o ião borato libertado é determinado por titulação com um ácido forte, usando como indicador vermelho de metilo ou verde de bromocresol (Clesceri et al., 1998; Padrão, 2004).

Para determinação do conteúdo em fósforo, a amostra de solo é digerida por uma combinação de ácidos fortes, de modo a oxidar toda a matéria orgânica e libertar o fósforo como ortofosfato. Por adição de molibdato de amónio é formado ácido molibdofosfórico. Na presença de vanádio é formado ácido vanadomolibdofosfórico de cor amarela. A intensidade da cor amarela é proporcional à concentração do fósforo e medida por espectrofotometria de absorção molecular no visível a 420 nm (Clesceri et al., 1998).

A análise química por fluorescência de Raios-X foi realizada num laboratório exterior, acreditado, e permitiu determinar os compostos predominantes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe, MnO, CaO, MgO, Na_2O , K_2O , TiO_2 e P_2O_5) do solo.

A composição mineralógica foi determinada por difracção de Raios-X em dois laboratórios exteriores.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de caracterização geotécnica foi possível determinar um conjunto de índices físicos considerados importantes na caracterização dos solos, designadamente: os percentis 10, 30 e 60 da distribuição granulométrica (D_{10} , D_{30} e D_{60}), a mediana da distribuição granulométrica (D_{50}), a dimensão máxima dos solos ($D_{\text{máx}}$), os coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c), as percentagens passadas nos peneiros nº4 (4,75 mm), nº10 (2,00 mm) e nº 200 (0,075 mm), a percentagem de material com dimensão inferior a 0,002 mm (argilas), o índice de plasticidade (IP), a actividade das argilas (A_t) e a porosidade (η). Os índices físicos directamente dependentes da análise granulométrica são obtidos por interpretação dos resultados da análise granulométrica. Os coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c) foram calculados com base nas Equações 2.1 e 2.2. O índice de plasticidade (IP) é expresso em percentagem e foi calculado com base nos valores dos limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP),

aplicando a Equação 2.3 e a actividade das argilas (A_t), aplicando a Equação 2.4. A porosidade (η) é expressa em percentagem e corresponde à relação entre o volume de poros e o volume total de uma amostra e foi calculada através da massa volúmica (ρ) e da densidade das partículas (G), aplicando a Equação 2.5. O teor em água de saturação (W_{st}) foi calculado a partir do volume de vazios do solo (V_v) e do volume total ocupado pelo solo (V), utilizando a Equação 2.6.

Equação 2.1:
$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Equação 2.2:
$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

Equação 2.3:
$$IP = LL - LP$$

Equação 2.4:
$$A_t = \frac{IP}{\%<2 \mu m}$$

Equação 2.5:
$$\eta = \frac{(G-\rho)}{G} \times 100$$

Equação 2.6:
$$W_{st} = \frac{V_v}{V} \times 100$$

A quantificação da população microbiana autóctone foi realizada directamente por contagem das células viáveis (CFU), de acordo com o procedimento que seguidamente se descreve:

- i. adição de 10 g de solo a 100 mL de solução salina esterilizada num frasco Erlenmeyer de 250 mL;
- ii. agitação da mistura durante 1 hora em agitador orbital a 150 rpm, à temperatura de 28 °C;
- iii. diluições sucessivas em solução salina estéril (10^{-2} a 10^{-5}) por transferências à chama em tubos de ensaio esterilizados e tapados;
- iv. espalhamento em meio LB de cada uma das diluições (em duplicado);
- v. incubação das placas de Petri a 28°C durante 3 dias;
- vi. contagem das unidades formadoras de colónias (CFU). Só foram consideradas válidas para contagem as placas com um mínimo de 30 e um máximo de 300 CFU (Ferreira et al., 1998; Sousa et al., 2005).

Nas amostras de granito (SR), calcário (CL) e xisto (XT) foram determinadas todas as características supracitadas. Nas amostras de BSoil, exclusivamente utilizadas nas culturas de enriquecimento para extracção do consórcio microbiano, não se justificava a realização de uma caracterização tão vasta, pelo que só foram determinados os teores em azoto e fósforo, o carbono total (TC), o carbono inorgânico (IC), o carbono orgânico total (TOC), a concentração em hidrocarbonetos petrolíferos totais (TPH) e a quantificação da população microbiana autóctone.

2.2.3. QUANTIFICAÇÃO DOS CONTAMINANTES NA FASE GASOSA

A quantificação dos contaminantes na fase gasosa foi realizada por cromatografia, gasosa com detector de ionização de chama (FID). Os gases utilizados foram hidrogénio e ar reconstituído para o detector e azoto como gás de transporte, com caudal de 1 mL min^{-1} .

A análise cromatográfica decorreu em modo isotérmico com coluna a 200°C , detector a 260°C , injector a 260°C e injeção em modo “splitless”; excepto nas análises da mistura dos quatro compostos (BTEoX) que, para separar os respectivos picos, a análise cromatográfica decorreu em modo isotérmico com coluna a 40°C , o detector a 260°C , o injector a 260°C e injeção em modo “splitless”. O volume injectado foi de $100 \mu\text{L}$.

Durante a execução deste trabalho foram construídas curvas de calibração de modo a cobrir as gamas de concentração obtidas nas diferentes fases de estudo. Os padrões utilizados foram preparados em ampolas de vidro de 307 mL ou em frascos Erlenmeyer de 592 mL (Figura 2.4). O volume destes recipientes foi calculado a partir da pesagem da massa de água destilada e desmineralizada necessária ao seu total enchimento. A preparação de cada padrão consistiu na injeção no recipiente de um volume rigoroso de contaminante, medido com seringas Hamilton 701N de $10 \mu\text{L}$. Seguidamente o recipiente foi deixado em repouso durante 10 minutos, de modo a garantir que todo o contaminante volatilizasse e se distribuisse uniformemente pelo recipiente. Os padrões assim preparados foram injectados no cromatógrafo e as rectas de calibração construídas, relacionando a área do pico do contaminante com a concentração do respectivo padrão. As rectas de calibração foram verificadas semanalmente; sempre que se verificaram alterações do valor da área do pico superiores a 5 % ou após paragens prolongadas do equipamento, foram construídas novas rectas de calibração. Esta metodologia foi aplicada na construção de rectas de calibração para benzeno, tolueno, etilbenzeno, xileno e para a mistura dos quatro compostos (BTEoX).



Figura 2.4 – Ampola de vidro (a) e frascos Erlenmeyer (b) utilizados na preparação de padrões.

A concentração de contaminante nos padrões (C_p) foi calculada utilizando a Equação 2.7.

Equação 2.7:
$$C_p = \frac{V_c \times \rho_c}{V_r}$$

onde: C_p é a concentração de contaminante nos padrões em mg L^{-1} , V_c é o volume de contaminante em μL , ρ_c é a massa volúmica do contaminante em $\text{mg } \mu\text{L}^{-1}$ e V_r o volume do recipiente utilizado em L.

2.2.4. QUANTIFICAÇÃO DO OXIGÉNIO E DO DIÓXIDO DE CARBONO NA FASE GASOSA

A quantificação do oxigénio e do dióxido de carbono na fase gasosa foi realizada por respirometria. No decurso dos trabalhos foram utilizados três respirómetros. Um respirómetro da marca Sable Systems, modelo TR8 (Figura 2.2 b), munido de um detector de infravermelhos com processamento electrónico, para determinação de dióxido de carbono, e de um detector electroquímico com uma pilha termoelétrica descartável contendo um electrólito ácido, um ânodo de um metal pesado e uma fina membrana permeável ao gás, para determinação do oxigénio (Vila, 2004); um respirómetro da marca Sensotec, modelo Rapidox 3100 (Figura 2.2 c), munido de um detector de infravermelhos, para determinação do dióxido de carbono e de um detector constituído por um tubo cerâmico de zircónio, para determinação do oxigénio, e um respirómetro da marca Servomex, modelo 5200 Multipurpose (Figura 2.2 d), equipado com um detector de infravermelhos de feixe simples e um só comprimento de onda, para determinação do dióxido de carbono, e de um detector constituído por um transdutor paramagnético de precisão elevada, para medição rápida e selectiva do oxigénio.

O respirómetro Sable – TR8, foi utilizado numa fase muito inicial dos trabalhos de investigação, operando em circuito fechado e modo contínuo.

O respirómetro Sensotec – Rapidox, foi utilizado em alguns ensaios exploratórios, operando em circuito fechado e modo contínuo.

O respirómetro Servomex – 5200 Multipurpose, foi utilizado nos ensaios de bio-ventilação, em circuito aberto e regime escalonado. A análise respirométrica foi realizada diariamente aplicando um fluxo de ar de 20 mL min^{-1} , durante um período de 15 minutos, ficando o circuito fechado no restante tempo.

2.2.5. ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DOS CONTAMINANTES

O conhecimento do modo como os contaminantes se distribuem pelas diferentes fases do solo é indispensável aos estudos de remediação, uma vez que esta distribuição influencia a disponibilidade e mobilidade dos contaminantes e permite calcular a eficiência teórica do processo de remediação aplicado. O estudo da distribuição ou partição dos contaminantes

pelas diferentes fases do solo foi realizado com recurso à elaboração de isotérmicas de equilíbrio.

Neste trabalho as isotérmicas de equilíbrio foram realizadas a 25°C. Numa primeira fase, os ensaios foram realizados em vials de 56,5 mL de volume, fechados com cápsulas de alumínio e septos de silicone com película de teflon; em cada vial foram introduzidos 30 g de solo húmido esterilizado, obtido por quartilha manual da amostra inicial e uma dada quantidade de contaminante (Figura 2.5 – a e b). Após várias tentativas verificou-se que os resultados obtidos não eram consistentes uma vez que, para o mesmo nível de contaminação, vials diferentes apresentavam concentrações muito diferentes e por vezes, para níveis de contaminação sucessivos, ocorria inversão de resultados. Estes factos estiveram certamente relacionados com a dificuldade em preparar provetes de solo de pequena massa com características idênticas e representativas da totalidade do solo em estudo, das dificuldades de medição rigorosa de muito pequenas quantidades de contaminantes voláteis e ainda devido ao sistema de fecho dos vials. Testaram-se vials sem solo, apenas com contaminante, tendo-se verificado que havia diminuição da concentração ao longo do tempo, o que só pode ser explicado pela ocorrência de fugas. Com base nestes factos, optou-se por aumentar a massa de solo utilizado em cada provete e os ensaios passaram a ser realizados nas colunas de aço inoxidável, com provetes de 2000 g de solo húmido esterilizado; esta opção revelou-se operacionalmente boa, mas temporalmente insustentável, uma vez que são necessários 5 a 10 dias para estabilizar cada patamar de contaminação (50 a 100 dias por isotérmica), sendo assim necessário dispor de um número elevado de reactores ou de um prolongado intervalo de tempo para concretizar o plano de ensaios definido. Como não era possível dispor de mais colunas, as que existiam eram necessárias para os ensaios de remediação, e como o tempo disponível era limitado, foi necessário voltar a introduzir alterações na metodologia. Os ensaios passaram a realizar-se em frascos Erlenmeyer com 1095 mL de volume total, fechados com válvulas Mininert. Neste caso, a massa do provete de solo húmido esterilizado passou a ser de 700 g e cada frasco foi utilizado para avaliar a distribuição de um dado contaminante num tipo de solo (Figura 2.5 – c). O solo foi sendo exposto a níveis crescentes de contaminação; o nível de contaminação “ $n+1$ ” era induzido após o nível de contaminação “ n ” estar estabilizado e quantificado. Os níveis de contaminação foram considerados estabilizados quando a variação da concentração na fase gasosa, em dois dias consecutivos, era inferior a 5%, havendo sempre um período mínimo de 3 dias para a estabilização. O controlo da temperatura de ensaio foi realizado conservando os frascos no interior de uma câmara termostática.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.5 – Preparação dos vials para ensaio. (a): Provetes obtidos por quartilha manual, (b) Conjunto de vials, (c) Conjunto de frascos Erlenmeyer

Os resultados apresentados no Capítulo 3 foram todos obtidos em ensaios realizados em frascos Erlenmeyer com 1095 mL de volume total, com provetes de 700 g de solo húmido esterilizado.

Construíram-se isotérmicas a 25 °C com benzeno, tolueno, etilbenzeno, xileno e com BTEoX, para solo granítico (SR) com 25 % de teor em água, para calcário (CL) com 11 % de teor em água e para xisto (XT) com 14,5 % de teor em água. Os solos utilizados foram previamente secos e esterilizados, sendo o teor em água conseguido por adição de água destilada e desmineralizada estéril. Os níveis de contaminação utilizados nos ensaios realizados nos frascos Erlenmeyer estão apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Níveis de contaminação utilizados nas isotérmicas

	Nível de Contaminação (mg de contaminante por kg de solo húmido)										
Granito	B	0,5	2,5	6,3	18,8	37,6	56,4	94,0	156,6	219,3	
	T	0,5	2,5	6,2	12,4	24,9	43,5	74,6	111,9	155,4	217,5
	E	0,5	2,5	6,2	12,4	24,7	43,3	74,2	111,3	154,6	216,5
	X	0,5	2,5	6,1	18,4	36,9	55,3	92,1	153,6	215,0	
	BTEoX	0,5	2,5	6,2	18,6	37,3	55,9	93,2	155,4	217,5	
Calcário	B	0,5	2,5	6,3	12,5	25,1	43,9	75,2	112,8	156,6	219,3
	T	0,5	2,5	6,2	12,4	24,9	43,5	74,6	111,9	155,4	217,5
	E	0,5	2,5	6,2	12,4	24,7	43,3	74,2	111,3	154,6	216,5
	X	0,5	2,5	6,1	18,4	36,9	55,3	92,1	153,6	215,0	
	BTEoX	0,5	2,5	6,2	18,6	37,3	55,9	93,2	155,4	217,5	
Xisto	B	0,5	2,5	6,3	12,5	25,1	43,9	75,2	112,8	156,6	219,3
	T	0,5	2,5	6,2	12,4	24,9	43,5	74,6	111,9	155,4	217,5
	E	0,5	2,5	6,2	12,4	24,7	43,3	74,2	111,3	154,6	216,5
	X	0,5	2,5	6,1	18,4	36,9	55,3	92,1	153,6	215,0	
	BTEoX	0,5	2,5	6,2	18,6	37,3	55,9	93,2	155,4	217,5	

As isotérmicas de equilíbrio foram construídas representando a concentração de contaminante na fase gasosa (C_{gas}) em função da concentração de contaminante na matriz sólida do solo (C_{soil}). A concentração de contaminante nas diferentes fases do solo foi calculada utilizando as Equações 2.8 a 2.12.

Equação 2.8: $C_{aq} = C_{gas} \div H$

Equação 2.9: $M_{aq} = C_{aq} \times V_{aq}$

Equação 2.10: $M_{gas} = C_{gas} \times V_{gas}$

Equação 2.11: $M_s = M_t - M_{gas} - M_{aq}$

Equação 2.12: $C_{soil} = M_s \div M_{soil}$

onde: C_{aq} é a concentração de contaminante na fase aquosa (mg L^{-1}), C_{gas} é a concentração de contaminante na fase gasosa (mg L^{-1}), C_{soil} é a concentração de contaminante na fase sólida, H

é a constante de Henry à temperatura da experiência, M_{aq} é a massa (mg) de contaminante na fase aquosa, M_{gas} é a massa (mg) de contaminante na fase gasosa; M_s é a massa (mg) de contaminante na fase sólida; M_t é a massa (mg) total de contaminante e M_{soil} é a massa (kg) total de solo seco; V_{aq} é o volume (L) da fase aquosa e V_{gas} é o volume (L) da fase gasosa.

O volume da fase gasosa foi calculado subtraindo ao volume total do reactor o volume ocupado pelas partículas secas e o volume da água adicionada.

As isotérmicas assim construídas descrevem a relação entre a quantidade de contaminante adsorvida por massa de adsorvente e a concentração de contaminante na fase gasosa, em condições de equilíbrio e a temperatura constante (Perry et al., 1984). Com o intuito de melhor compreender a distribuição dos contaminantes pelas diferentes fases dos solos, foram ajustados aos dados experimentais os modelos de Langmuir e de Freundlich. Aplicando as Equações 1.1 e 1.3 aos casos estudados, estes modelos são traduzidos pelas Equações 2.13 e 2.14, respectivamente.

Equação 2.13:
$$C_{soil} = b \frac{K_L C_{gas}}{1 + K_L C_{gas}}$$

Equação 2.14:
$$C_{soil} = K_F C_{gas}^n$$

onde: C_{soil} é a concentração (mg kg⁻¹) de contaminante na matriz sólida do solo, C_{gas} é a concentração (mg L⁻¹) de contaminante na fase gasosa, b é a capacidade máxima de adsorção do ajuste de Langmuir, K_L é a constante de equilíbrio de Langmuir, K_F é a constante de equilíbrio de Freundlich e n é a potência do ajuste de Freundlich.

As isotérmicas traçadas relacionam a concentração de contaminante na fase gasosa, determinada por cromatografia gasosa, com a concentração de contaminante na fase sólida dos solos ensaiados. Com base nestas relações, foi possível determinar a massa residual de contaminante no solo no final de cada ensaio de remediação, a partir da concentração na fase gasosa determinada por cromatografia gasosa. Conhecida a massa inicial de contaminante introduzido no sistema e as massas que no final dos ensaios de remediação permanecem nas fases gasosa, aquosa e sólida, é possível determinar a eficiência da remediação aplicando a Equação 2.15.

Equação 2.15:
$$E_f = \frac{M_t - (M_{gas} + M_{aq} + M_s)}{M_t} \times 100$$

onde: E_f é a eficiência teórica de remediação, M_t é a massa (mg) total de contaminante; M_{gas} é a massa (mg) de contaminante na fase gasosa, M_{aq} é a massa (mg) de contaminante na fase aquosa e M_s é a massa (mg) de contaminante no solo.

2.2.6. ENSAIOS EXPLORATÓRIOS DE BIO-DEGRADAÇÃO EM MEIO LÍQUIDO

Os estudos de bio-degradação realizados em meio líquido (MMA) tiveram como principais objectivos isolar e desenvolver o consórcio microbiano extraído de BSoil, adaptar os microrganismos aos contaminantes e avaliar a cinética da bio-degradação. O meio mineral líquido foi descrito no subcapítulo 2.1 e como contaminantes e fontes de carbono foram utilizados inicialmente xileno (XL) e posteriormente benzeno (BZ).

As culturas de enriquecimento (EC) em meio líquido foram preparadas em frascos Erlenmeyer de 250 mL; adicionaram-se 10 g de BSoil a 90 mL de MMA. As culturas foram deixadas a incubar durante 24 horas, com agitação (150 rpm), no interior da câmara termostática à temperatura de 28°C. Seguidamente, com o intuito de desenvolver e adaptar o consócio microbiano, realizaram-se transferências sucessivas (T1, T2 e T3). As transferências foram realizadas em frascos Erlenmeyer de 500 ou 1000 mL, fechados com válvulas Mininert®, adicionando inóculo (EC, T1 ou T2), meio mineral (MMA) e contaminante. Nas primeiras transferências (T1) foram utilizadas como inóculo as culturas de enriquecimento (EC), na razão EC:MMA de 5:95 (v:v). Nas transferências subsequentes (T2 e T3) foram utilizadas como inóculos as culturas T1 e T2, respectivamente, numa razão T:MMA de 50:50 (v:v). As culturas T1, T2 e T3 foram incubadas com agitação (150 rpm), no interior da câmara termostática à temperatura de 28°C. Na Figura 2.6 apresenta-se um esquema do procedimento adoptado. A concentração de contaminante na fase gasosa foi monitorizada por cromatografia gasosa e o período de incubação terminou sempre que se atingiram concentrações inferiores a 0,5 mg L⁻¹. No final de cada ensaio, com o objectivo de observar e quantificar a população microbiana, foram executadas diluições sucessivas em solução salina estéril (10⁻² a 10⁻⁴) e foram contadas as unidades formadoras de colónias (CFU), como descrito em 2.2.3. A Figura 2.7 ilustra alguns pormenores dos ensaios realizados: culturas em meio líquido (a) e o espalhamento em meio sólido (b).

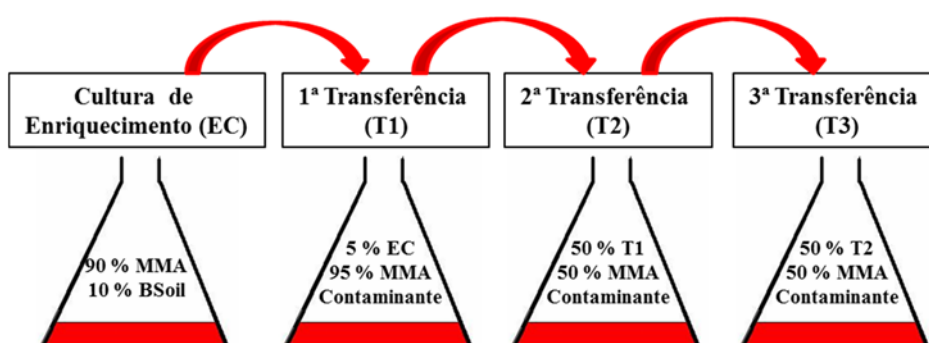
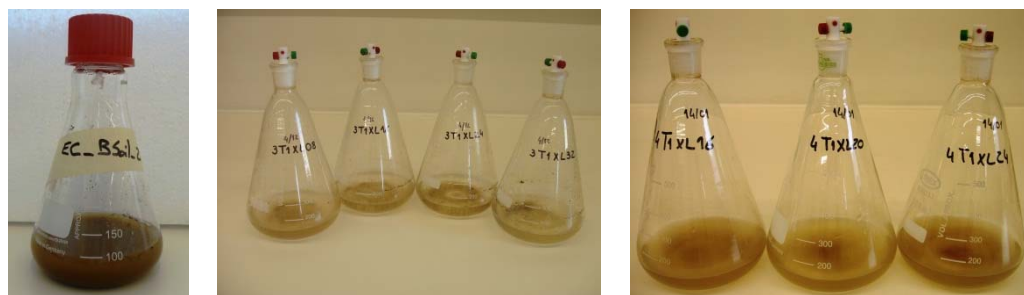


Figura 2.6 – Esquema das culturas em meio líquido



(a)



(b)

Figura 2.7 – Culturas de enriquecimento. (a) Culturas em meio líquido; (b) Espalhamento em meio sólido.

Nestes estudos foram utilizados como contaminantes xileno e benzeno, tendo sido testados diversos níveis de contaminação. Numa fase inicial, com o intuito de avaliar a capacidade de adaptação dos microrganismos ao xileno, foram testados vários níveis de contaminação (34, 69, 138, 172, 206, 275 e 344 mg L⁻¹); posteriormente, foi avaliada a cinética da biodegradação nos níveis de contaminação considerados mais adequados (138, 172, 206 mg L⁻¹). No caso de benzeno, como já havia conhecimento prévio relativamente ao comportamento do consórcio, a gama de contaminação estudada foi, logo à partida, mais apertada (70, 140, 180, 210 e 280 mg L⁻¹), tendo esta sido posteriormente reduzida (180, 210 e 280 mg L⁻¹).

Na Tabela 2.4 apresenta-se uma síntese dos níveis de contaminação utilizados, expressos em miligrama de contaminante por litro de inóculo e na Tabela 2.5 uma síntese dos ensaios realizados. Na designação de cada ensaio (#T#XL/BZ#) referencia-se a cultura de enriquecimento utilizada (3, 4, 5, 6 ou 7), a ordem de transferência (T1, T2 ou T3), o contaminante utilizado (XL para o xileno e BZ para o benzeno) e finalmente a concentração de contaminante utilizada em mg L⁻¹ (34, 69, 70, 138, 140, 172, 180, 206, 210, 275, 280 ou 344).

Tabela 2.4 – Níveis de contaminação utilizados nos ensaios em meio líquido

Contaminante	Nível de Contaminação (mg L ⁻¹)						
Xileno	34	69	138	172	206	275	344
Benzeno	---	70	140	180	210	280	---

Tabela 2.5 – Síntese dos ensaios realizados em meio líquido

Cultura Enriquecimento	Contaminante	Concentração de Contaminante (mg L ⁻¹)	1 ^a Transferência	2 ^a Transferência	3 ^a Transferência
3EC	Xileno	34	3T1XL34	3T2XL34	
	Xileno	69	3T1XL69	3T2XL69	
	Xileno	138	3T1XL138	3T2XL138	
	Xileno	172	3T1XL172	3T2XL172	
	Xileno	206	3T1XL206	3T2XL206	
	Xileno	275	3T1XL275	3T2XL275	
	Xileno	344	3T1XL344		
4EC	Xileno	138	4T1XL138	4T2XL138	4T3XL138
	Xileno	172	4T1XL172	4T2XL172	4T3XL172
	Xileno	206	4T1XL206	4T2XL206	4T3XL206
5EC	Xileno	138	5T1XL138	5T2XL138	5T3XL138
	Xileno	172	5T1XL172	5T2XL172	5T3XL172
	Xileno	206	5T1XL206	5T2XL206	5T3XL206
6EC	Benzeno	70	6T1BZ70	6T2BZ70	6T3BZ70
	Benzeno	140	6T1BZ140	6T2BZ140	6T3BZ140
	Benzeno	180	6T1BZ180	6T2BZ180	6T3BZ180
	Benzeno	210	6T1BZ210	6T2BZ210	6T3BZ210
	Benzeno	280	6T1BZ280	6T2BZ280	6T3BZ280
7EC	Benzeno	180	7T1BZ180	7T2BZ180	7T3BZ180
	Benzeno	210	7T1BZ210	7T2BZ210	7T3BZ210
	Benzeno	280	7T1BZ280	7T2BZ280	7T3BZ280

A metodologia apresentada foi posteriormente usada para obtenção do inóculo utilizado em todos os ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação (Figura 2.8). Na produção de inóculo foram utilizados, não só o benzeno e o xileno, mas também o tolueno, o etilbenzeno e a mistura BTEoX.

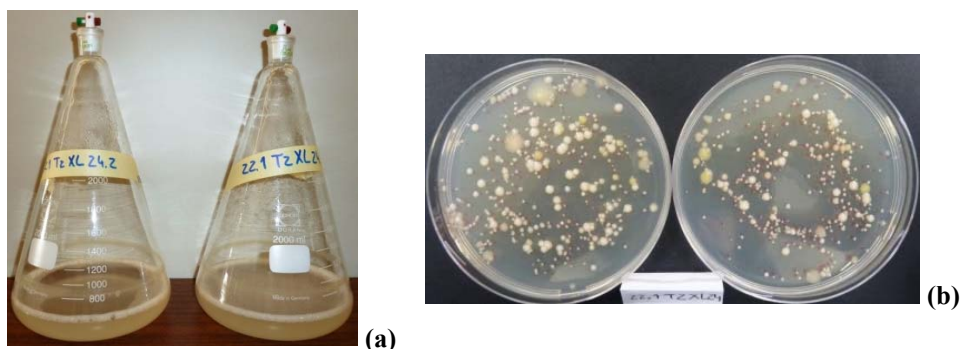


Figura 2.8 – Ensaio em meio líquido. (a) Inóculo preparado com xileno; (b) Consórcio microbiano presente no inóculo.

2.2.7. ENSAIOS EXPLORATÓRIOS DE BIO-REMEDIAÇÃO DE SOLOS

Os ensaios exploratórios de bio-remediação dos contaminantes nos solos seleccionados foram realizados em duas escalas, correspondendo a duas fases consecutivas de ensaio: inicialmente em frascos Erlenmeyer fechados e seguidamente em colunas de aço inoxidável com 3917 mL de volume e 50 cm de altura, especificamente construída para o efeito. Como contaminantes foram utilizados xileno e benzeno. Com o intuito de avaliar a degradação abiótica dos contaminantes foram realizados, em ambas as escalas de ensaio e para ambos os contaminantes, testes não inoculados. Os ensaios não inoculados realizaram-se utilizando solos previamente esterilizados (Branco Estéreis) e solos não esterilizados (Branco). O teor em humidade dos solos foi obtido por adição ao solo seco de água destilada e desmineralizada esterilizada, no caso dos ensaios não inoculados, e por adição de inóculo resultante das segundas transferências no caso dos ensaios inoculados. Na designação de cada ensaio referenciou-se o tipo de reactor utilizado (F para os frascos e C para as colunas de aço), o tipo de ensaio, (BE para os branco estéreis, B para os branco e sem qualquer indicação para os ensaios inoculados), o tipo de solo (SR para o solo residual granítico, CL para o solo calcário e XT para o solo xistoso), a concentração de contaminante em miligramas por quilo de solo (70, 86, 103, 105, 140 ou 155) e o contaminante utilizado (XL para o xileno e BZ para o benzeno); quando necessário, indicou-se a temperatura de ensaio entre parenteses (20, 25 ou 26) e finalmente o número de ordem da réplica (1, 2, etc.).

A concentração de contaminante na fase gasosa foi monitorizada por cromatografia gasosa e o período de bio-remediação foi ditado pela obtenção de uma concentração residual de contaminante na fase gasosa menor ou igual a 0,5 mg L⁻¹.

No final de cada ensaio, com o objectivo de observar e quantificar a população microbiana, executaram-se diluições sucessivas em solução salina estéril (10^{-2} a 10^{-4}) e contaram-se as unidades formadoras de colónias (CFU), de acordo com o descrito em 2.2.3. Foi ainda calculada a eficiência teórica da bio-remediação (E_f), com base na aplicação da Equação 2.15.

2.2.7.1. ENSAIOS EM FRASCO DE SOLOS CONTAMINADOS COM XILENO

Nos ensaios exploratórios de bio-remediação em frasco foram utilizados provetes de 200 g ou 400 g de solo húmido. Os teores em humidade utilizados dependem do tipo de solo, uma vez que os três subsolos estudados apresentam diferentes capacidades de reter água na sua estrutura. Foram utilizados teores de humidade elevados garantindo, no entanto, a inexistência de água livre no solo. Os teores em água adoptados foram de 25 % no solo residual granítico, 14 % no solo xistoso e 11 % no solo calcário.

Os primeiros ensaios realizados utilizaram solo residual granítico (200 g) e decorreram a duas temperaturas diferentes, 20 e 26°C, para avaliar a influência da temperatura na cinética de bio-remediação do xileno. À semelhança da metodologia utilizada nos ensaios em meio líquido, também, neste caso, se testaram vários níveis de contaminação: 70, 86 e 103 mg de xileno por quilograma de solo. Com base nos resultados obtidos nestes primeiros ensaios, os ensaios de bio-remediação em frasco passaram a ser realizados à temperatura de 25 °C, em provetes de 400 g com contaminação de 103 mg de xileno por quilograma de solo. Foram então realizados ensaios inoculados e não inoculados (brancos e brancos estéreis), à temperatura de 25 °C, nos três tipos de solos (SR, CL e XT).

Na Figura 2.9 estão ilustrados alguns dos ensaios executados e na Tabela 2.6 apresenta-se uma síntese de todos os ensaios exploratórios de bio-remediação de solos contaminados com xileno realizados em frasco, indicando as suas especificidades.

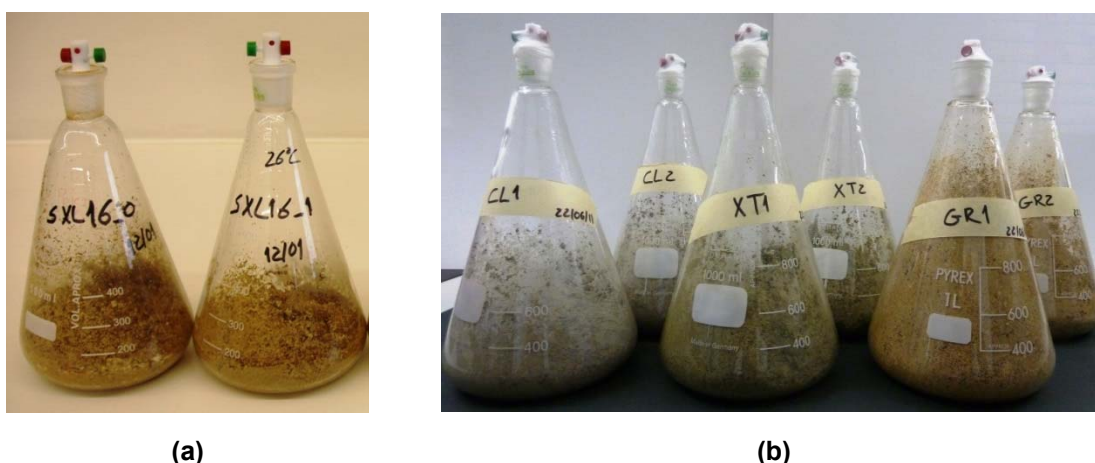


Figura 2.9 – Ensaio de bio-remediação de solos contaminados com xileno realizados em frasco:
(a) 1ª fase de ensaios em solo residual granítico a 20 e 26 °C. (b) 2ª fase de ensaios nos três tipos de subsolo em estudo: granítico, calcário e xistoso a 25 °C.

Tabela 2.6 - Síntese dos ensaios exploratórios de bio-remediação de solos contaminados com xileno realizados em frasco.

Designação do Ensaio	Tipo de Solo (a) / Teor em Água (%)	Tipo de Ensaio	Concentração de Xileno (mg kg ⁻¹)	Temperatura (°C)
FSR70XL(20)	SR / 25	Inoculado	70	20
FSR86XL(20)	SR / 25	Inoculado	86	20
FSR103XL(20)	SR / 25	Inoculado	103	20
FBSR70XL(20)	SR / 25	Não Inoculado	70	20
FBSR86XL(20)	SR / 25	Não Inoculado	86	20
FBSR103XL(20)	SR / 25	Não Inoculado	103	20
FSR70XL(26)	SR / 25	Inoculado	70	26
FSR86XL(26)	SR / 25	Inoculado	86	26
FSR103XL(26)	SR / 25	Inoculado	103	26
FBSR70XL(26)	SR / 25	Não Inoculado	70	26
FBSR86XL(26)	SR / 25	Não Inoculado	86	26
FBSR103XL(26)	SR / 25	Não Inoculado	103	26
FSR103XL(25)_1	SR / 25	Inoculado	103	25
FSR103XL(25)_2	SR / 25	Inoculado	103	25
FBSRXL103(25)	SR / 25	Não Inoculado	103	25
FBESR103XL(25)	SR Esterilizado / 25	Não Inoculado	103	25
FCL103XL(25)_1	CL / 11	Inoculado	103	25
FCL103XL(25)_2	CL / 11	Inoculado	103	25
FBCLXL103(25)	CL / 11	Não Inoculado	103	25
FBECL103XL(25)	CL Esterilizado / 11	Não Inoculado	103	25
FXT103XL(25)_1	XT / 14,5	Inoculado	103	25
FXT103XL(25)_2	XT / 14,5	Inoculado	103	25
FBXTXL103(25)	XT / 14,5	Não Inoculado	103	25
FBEXT103XL(25)	XT Esterilizado / 14,5	Não Inoculado	103	25

(a) SR – Solo residual granítico; CL – Calcário e XT - Xisto

2.2.7.2. ENSAIOS EM FRASCO DE SOLOS CONTAMINADOS COM BENZENO

Os ensaios exploratórios de bio-remediação de benzeno em frasco foram realizados em provetes de 200 g de solo residual granítico (SR) com 25 % de teor em água. Realizaram-se ensaios inoculados e não inoculados, a 25 °C e com três níveis diferentes de contaminação (88, 105 e 140 mg kg⁻¹). Na Tabela 2.7 apresenta-se uma síntese de todos os ensaios de bio-remediação de solos contaminados com benzeno realizados em frasco, indicando as suas especificidades.

Tabela 2.7 - Síntese dos ensaios exploratórios de bio-remediação de solo granítico (SR) contaminado com benzeno realizados em frasco.

Designação do Ensaio	Tipo de Solo / Teor em Água (%)	Tipo de Ensaio	Concentração de Benzeno (mg kg ⁻¹)	Temperatura (°C)
FSR88BZ(25)	SR / 25	Inoculado	88	25
FSR105BZ(25)	SR / 25	Inoculado	105	25
FSR140BZ(25)	SR / 25	Inoculado	140	25
FBSR88BZ(25)	SR / 25	Não Inoculado	88	25
FBSR105BZ(25)	SR / 25	Não Inoculado	105	25
FBSR140BZ(25)	SR / 25	Não Inoculado	140	25

2.2.7.3. ENSAIOS EM COLUNA DE SOLOS CONTAMINADOS COM XILENO

Os estudos exploratórios de bio-remediação em coluna de aço inoxidável, realizados em solos contaminados com xileno, foram executados em duas fases: numa fase inicial testou-se a bio-remediação em SR à temperatura ambiente de cerca de 23 °C, com nível de contaminação de 103 mg kg⁻¹ e, numa segunda fase, testou-se a bio-remediação nos três tipos de solo (SR, CL e XT), a 25 °C, com nível de contaminação de 155 mg kg⁻¹. Em ambas as fases foram utilizados provetes de 2000 g de solo húmido e realizados ensaios inoculados e não inoculados. Na Tabela 2.8 apresenta-se uma síntese de todos os ensaios de bio-remediação de solos contaminados com xileno realizados em coluna, indicando as suas especificidades. A monitorização da concentração na fase gasosa foi realizada por cromatografia gasosa a partir de uma amostra de ar (100 µL) obtida com seringa na porta de amostragem lateral superior (P2 da Figura 2.1 c).

Tabela 2.8 - Síntese dos ensaios exploratórios de bio-remediação de solos contaminados com xileno realizados em coluna.

Designação do Ensaio	Tipo de Solo (a) / Teor em Água (%)	Tipo de Ensaio	Concentração de Xileno (mg kg ⁻¹)	Temperatura (°C)
CSR103XL_1	SR / 25	Inoculado	103	23
CSR103XL_2	SR / 25	Inoculado	103	23
CBSR103XL	SR / 25	Não Inoculado	103	23
CBESR103XL	SR / 25	Não Inoculado	103	23
CSR155XL_1	SR / 25	Inoculado	155	25
CSR155XL_2	SR / 25	Inoculado	155	25
CBSR155XL	SR / 25	Não Inoculado	155	25
CCL155XL_1	CL / 11	Inoculado	155	25
CCL155XL_2	CL / 11	Inoculado	155	25
CBCL155XL	CL / 11	Não Inoculado	155	25
CXT155XL_1	XT / 14,5	Inoculado	155	25
CXT155XL_2	XT / 14,5	Inoculado	155	25
CBXT155XL	XT / 14,5	Não Inoculado	155	25

(a) SR – Solo residual granítico; CL – Calcário e XT - Xisto

2.2.7.4. ENSAIOS EM COLUNA DE SOLOS CONTAMINADOS COM BENZENO

Os estudos exploratórios de bio-remediação em coluna de aço inoxidável realizados em solos contaminados com benzeno foram executados à temperatura ambiente de cerca de 23 °C. Utilizaram-se provetes de 2000 g de solo residual granítico (SR) com 25 % de humidade e contaminado com 280 mg de benzeno (140 mg kg⁻¹). Realizaram-se ensaios inoculados e não inoculados. Na Tabela 2.9 apresenta-se uma síntese de todos os ensaios de bio-remediação de solos contaminados com benzeno realizados em coluna, indicando as suas especificidades. A monitorização da concentração na fase gasosa foi realizada por cromatografia gasosa a partir de uma amostra de ar (100 µL) obtida com seringa na porta de amostragem lateral superior (P2 da Figura 2.1 c).

Tabela 2.9 - Síntese dos ensaios exploratórios de bio-remediação de solo granítico (SR) contaminado com benzeno realizados em coluna.

Designação do Ensaio	Tipo de Solo / Teor em Água (%)	Tipo de Ensaio	Concentração de Benzeno (mg kg ⁻¹)	Temperatura (°C)
CSR140BZ_1	SR / 25	Inoculado	140	23
CSR140BZ_2	SR / 25	Inoculado	140	23
CBSR140BZ	SR / 25	Não Inoculado	140	23
CBESR140BZ	SR Esterilizado / 25	Não Inoculado	140	23

2.2.8. ENSAIOS DE BIO-REMEDIÇÃO E DE BIO-VENTILAÇÃO

Tal como já foi oportunamente referido no Capítulo 1, serão designados por ensaios de bio-remediação os ensaios de bio-degradação assistida (bio-amplificação e bio-estimulação) sem ventilação e serão designados por ensaios de bio-ventilação os ensaios de bio-degradação assistida (bio-amplificação e bio-estimulação) com ventilação.

Os ensaios de bio-remediação foram todos realizados nas colunas de aço inoxidável com 35,5 cm de altura (2788 mL de capacidade), em provetes de 1420 g de solo húmido. Os ensaios de bio-ventilação foram todos realizados em colunas de aço inoxidável com 50 cm de altura (3917 mL de capacidade), em provetes de 2000 g de solo húmido. Em todos os casos, o nível de contaminação utilizado foi de 200 mg de contaminante por quilograma de solo. Os solos estudados foram o granito (SR), com 25 % de teor em água, o calcário (CL), com 11 % de teor em água e o xisto (XT), com 14,5 % de teor em água. Os contaminantes estudados foram o benzeno, o tolueno, o etilbenzeno, o xileno e a mistura BTEoX. Foram realizados ensaios inoculados e não inoculados (brancos estéreis), à temperatura de 25 °C. À semelhança dos ensaios exploratórios, a humidade nos solos foi obtida, no caso dos ensaios não inoculados, por adição ao solo seco de água destilada desmineralizada esterilizada e no caso dos ensaios inoculados, por adição de inóculo resultante das segundas transferências.

A preparação das colunas de ensaio foi executada aplicando os passos seguidamente apresentados:

- desinfecção do interior da coluna com álcool etílico a 96 % (v:v);
- colocação de septos ou válvula de fecho em todas as portas da coluna;
- introdução do solo previamente humedecido na coluna;
- colocação da tampa e fecho da coluna;
- colocação da coluna na horizontal;
- adição de contaminante, utilizando uma seringa, a partir das portas laterais (P2 e P3 da Figura 2.1 c) da coluna (50% em cada porta);

- g) agitação do sistema invertendo a sua posição 3 vezes;
- h) colocação da coluna, na vertical, no interior da câmara termostática a temperatura controlada de 25 °C.

Os ensaios de bio-ventilação foram realizados com bombagem e respirometria escalonada. O sistema foi diariamente sujeito à passagem de um caudal de ar de 20 mL min⁻¹ durante quinze minutos. O ar era introduzido na coluna pela porta de amostragem existente na sua base (P4 da Figura 2.1c) e saía da coluna pela porta existente na sua tampa (P1 da Figura 2.1c). Após sair da coluna, o ar passava pelo controlador de caudal e seguidamente, pelo respirómetro, para determinação da concentração em oxigénio e em dióxido de carbono, sendo depois conduzido ao esgoto. Na tubagem de entrada de ar foi colocado um filtro de acetato de celulose, com poros de 0,20 µm, para impedir a entrada de partículas e uma válvula que impedia a saída de ar para o exterior; na tubagem que ligava a coluna ao controlador de caudal foi colocada uma válvula de corte que permitia abrir e fechar o sistema. Na Figura 2.10 estão ilustrados os ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação.

Tanto no caso dos ensaios de bio-remediação como nos de bio-ventilação, a monitorização da concentração de contaminante na fase gasosa foi executada diariamente por cromatografia gasosa a partir de uma amostra de ar (100 µL) obtida na porta lateral superior das colunas (P2 da Figura 2.1 c), utilizando uma seringa. No caso dos ensaios de bio-ventilação, a toma de amostra foi sempre executada antes de se iniciar a circulação de ar. Os ensaios foram dados por terminados quando em três dias consecutivos a concentração de contaminante na fase gasosa era menor ou igual a 0,5 mg L⁻¹.

No final de cada ensaio, foram colhidas amostras de solo remediado para quantificação da população microbiana.

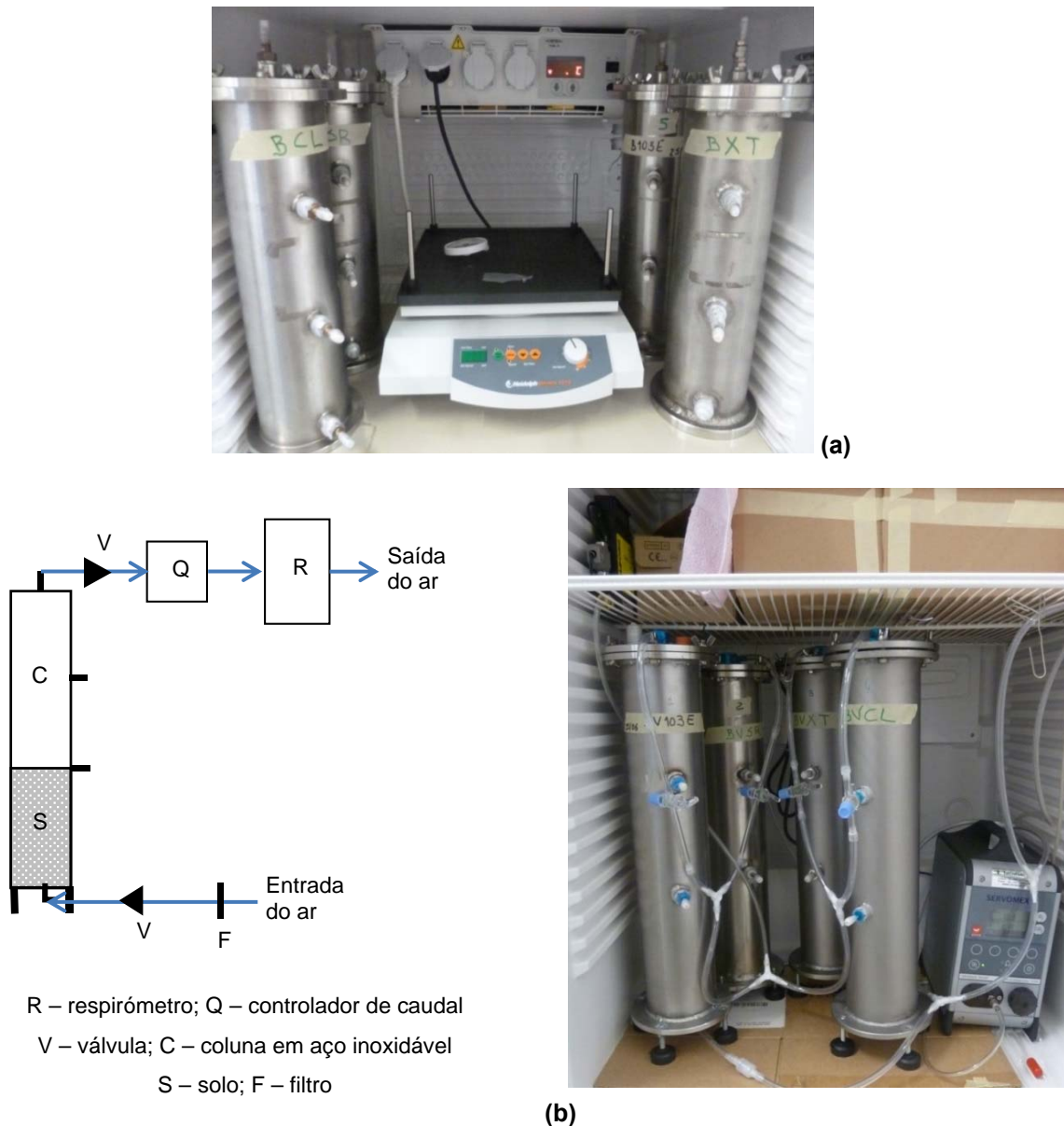


Figura 2.10 – (a) Instalação dos ensaios de bio-remediação; (b) Instalação dos ensaios de bio-ventilação

No total foram realizados sessenta e oito ensaios. Em calcário realizaram-se vinte ensaios, dos quais dez foram inoculados e os restantes dez não inoculados; na Tabela 2.10 é apresentada uma síntese das especificidades destes ensaios. Em granito foram realizados vinte e oito ensaios, dos quais dezoito foram inoculados e os restantes dez não inoculados; na Tabela 2.11 é apresentada uma síntese das especificidades destes ensaios. Em xisto realizaram-se vinte ensaios, dos quais dez foram inoculados e os restantes dez não inoculados; na Tabela 2.12, é apresentada uma síntese das especificidades destes ensaios. Na designação de cada ensaio referenciou-se o tipo de ensaio, (B para os de bio-remediação inoculados, Bb para os de bio-remediação não inoculados, BV para os de bio-ventilação inoculados e BVb para os de bio-ventilação não inoculados), o tipo de solo (SR para o solo residual granítico, CL para o solo

calcário e XT para o solo xistoso) e o contaminante utilizado (B para o benzeno, T para o tolueno, E para o etilbenzeno, X para o xileno e BTEX para a mistura BTEoX).

Tabela 2.10 - Síntese dos ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação realizados em calcário.

Designação do Ensaio	Tipo de Solo / Teor em Água (%)	Tipo de Ensaio	Contaminante
BCL_B	Calcário / 11	Inoculado não ventilado	Benzeno
BCL_T	Calcário / 11	Inoculado não ventilado	Tolueno
BCL_E	Calcário / 11	Inoculado não ventilado	Etilbenzeno
BCL_X	Calcário / 11	Inoculado não ventilado	Xileno
BCL_BTEoX	Calcário / 11	Inoculado não ventilado	BTEoX
BbCL_B	Calcário / 11	Não inoculado e não ventilado	Benzeno
BbCL_T	Calcário / 11	Não inoculado e não ventilado	Tolueno
BbCL_E	Calcário / 11	Não inoculado e não ventilado	Etilbenzeno
BbCL_X	Calcário / 11	Não inoculado e não ventilado	Xileno
BbCL_BTEoX	Calcário / 11	Não inoculado e não ventilado	BTEoX
BVCL_B	Calcário / 11	Inoculado ventilado	Benzeno
BVCL_T	Calcário / 11	Inoculado ventilado	Tolueno
BVCL_E	Calcário / 11	Inoculado ventilado	Etilbenzeno
BVCL_X	Calcário / 11	Inoculado ventilado	Xileno
BVCL_BTEoX	Calcário / 11	Inoculado ventilado	BTEoX
BVbCL_B	Calcário / 11	Não inoculado ventilado	Benzeno
BVbCL_T	Calcário / 11	Não inoculado ventilado	Tolueno
BVbCL_E	Calcário / 11	Não inoculado ventilado	Etilbenzeno
BVbCL_X	Calcário / 11	Não inoculado ventilado	Xileno
BVbCL_BTEoX	Calcário / 11	Não inoculado ventilado	BTEoX

Tabela 2.11 - Síntese dos ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação realizados em granito.

Designação do Ensaio	Tipo de Solo	Tipo de Ensaio	Contaminante
BSR_B	Granito / 25	Inoculado não ventilado	Benzeno
BSR2_B	Granito / 25	Inoculado não ventilado	Benzeno
BSR_T	Granito / 25	Inoculado não ventilado	Tolueno
BSR2_T	Granito / 25	Inoculado não ventilado	Tolueno
BSR_E	Granito / 25	Inoculado não ventilado	Etilbenzeno
BSR2_E	Granito / 25	Inoculado não ventilado	Etilbenzeno
BSR_X	Granito / 25	Inoculado não ventilado	Xileno
BSR2_X	Granito / 25	Inoculado não ventilado	Xileno
BSR_BTEx	Granito / 25	Inoculado não ventilado	BTEoX
BbSR_B	Granito / 25	Não inoculado e não ventilado	Benzeno
BbSR_T	Granito / 25	Não inoculado e não ventilado	Tolueno
BbSR_E	Granito / 25	Não inoculado e não ventilado	Etilbenzeno
BbSR_X	Granito / 25	Não inoculado e não ventilado	Xileno
BbSR_BTEx	Granito / 25	Não inoculado e não ventilado	BTEoX
BVSR_B	Granito / 25	Inoculado ventilado	Benzeno
BVSR2_B	Granito / 25	Inoculado ventilado	Benzeno
BVSR_T	Granito / 25	Inoculado ventilado	Tolueno
BVSR2_T	Granito / 25	Inoculado ventilado	Tolueno
BVSR_E	Granito / 25	Inoculado ventilado	Etilbenzeno
BVSR2_E	Granito / 25	Inoculado ventilado	Etilbenzeno
BVSR_X	Granito / 25	Inoculado ventilado	Xileno
BVSR2_X	Granito / 25	Inoculado ventilado	Xileno
BVSR_BTEx	Granito / 25	Inoculado ventilado	BTEoX
BVbSR_B	Granito / 25	Não inoculado ventilado	Benzeno
BVbSR_T	Granito / 25	Não inoculado ventilado	Tolueno
BVbSR_E	Granito / 25	Não inoculado ventilado	Etilbenzeno
BVbSR_X	Granito / 25	Não inoculado ventilado	Xileno
BVbSR_BTEx	Granito / 25	Não inoculado ventilado	BTEoX

Tabela 2.12 - Síntese dos ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação realizados em xisto.

Designação do Ensaio	Tipo de Solo	Tipo de Ensaio	Contaminante
BXT_B	Xisto / 14,5	Inoculado não ventilado	Benzeno
BXT_T	Xisto / 14,5	Inoculado não ventilado	Tolueno
BXT_E	Xisto / 14,5	Inoculado não ventilado	Etilbenzeno
BXT_X	Xisto / 14,5	Inoculado não ventilado	Xileno
BXT_BTEoX	Xisto / 14,5	Inoculado não ventilado	BTEoX
BbXT_B	Xisto / 14,5	Não inoculado e não ventilado	Benzeno
BbXT_T	Xisto / 14,5	Não inoculado e não ventilado	Tolueno
BbXT_E	Xisto / 14,5	Não inoculado e não ventilado	Etilbenzeno
BbXT_X	Xisto / 14,5	Não inoculado e não ventilado	Xileno
BbXT_BTEoX	Xisto / 14,5	Não inoculado e não ventilado	BTEoX
BVXT_B	Xisto / 14,5	Inoculado ventilado	Benzeno
BVXT_T	Xisto / 14,5	Inoculado ventilado	Tolueno
BVXT_E	Xisto / 14,5	Inoculado ventilado	Etilbenzeno
BVXT_X	Xisto / 14,5	Inoculado ventilado	Xileno
BVXT_BTEoX	Xisto / 14,5	Inoculado ventilado	BTEoX
BVbXT_B	Xisto / 14,5	Não inoculado ventilado	Benzeno
BVbXT_T	Xisto / 14,5	Não inoculado ventilado	Tolueno
BVbXT_E	Xisto / 14,5	Não inoculado ventilado	Etilbenzeno
BVbXT_X	Xisto / 14,5	Não inoculado ventilado	Xileno
BVbXT_BTEoX	Xisto / 14,5	Não inoculado ventilado	BTEoX

2.2.9. METODOLOGIA DE INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS DE BIO-REMEDIAÇÃO E DE BIO-VENTILAÇÃO

A interpretação dos ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação foi feita em duas fases. Na primeira fase, acompanhando a realização dos ensaios, foi sendo representada a evolução ao longo do tempo dos parâmetros de ensaio que estavam a ser controlados: concentrações do contaminante na fase gasosa, em todos os ensaios, e concentrações de oxigénio e dióxido de carbono na fase gasosa, nos ensaios de bio-ventilação. Posteriormente, foi aplicada a metodologia proposta por Mackay (Mackay, 2001) e foram desenvolvidos modelos matemáticos que permitiram calcular os resultados teoricamente espectáveis, que foram comparados com os dados experimentais.

Os ensaios de bio-remediação não inoculados foram modelados utilizando um modelo dito de Nível 1 (Mackay, 2001) considerando que se trata de um sistema fechado, em equilíbrio e sem ocorrência de reacções. A aplicação deste modelo engloba cinco passos fundamentais:

- i. definição da geometria do sistema;
- ii. definição de parâmetros intrínsecos ao solo e aos contaminantes;
- iii. cálculo das constantes de capacidade em fugacidade, que passarão a ser designadas por capacidades compartimentais (Fiúza, 2010);
- iv. cálculo da fugacidade;
- v. cálculo da concentração de contaminante presente em cada compartimento.

Os ensaios de bio-remediação inoculados foram modelados utilizando um modelo de Nível 2b (Mackay, 2001), considerando que se trata de um sistema fechado, com equilíbrio entre as fases, com sumidouros (aniquilação por bio-degradação), em estado transiente. A aplicação deste modelo engloba nove passos fundamentais:

- i. definição da geometria do sistema;
- ii. definição de parâmetros intrínsecos ao solo e aos contaminantes;
- iii. cálculo das capacidades compartimentais;
- iv. cálculo da fugacidade inicial;
- v. cálculo da concentração inicial de contaminante presente em cada compartimento;
- vi. cálculo dos parâmetros de desaparecimento por reacção (bio-degradação);
- vii. cálculo da constante cinética;
- viii. cálculo das fugacidades ao longo do tempo;
- ix. cálculo da concentração de contaminante presente em cada compartimento ao longo do tempo.

Os ensaios de bio-ventilação não inoculados foram modelados utilizando um modelo de Nível 2b (Mackay, 2001), considerando que se trata de um sistema em equilíbrio, com sumidouros, em estado transiente. A aplicação deste modelo engloba onze passos fundamentais:

- i. definição da geometria do sistema;
- ii. definição de parâmetros intrínsecos ao solo e aos contaminantes
- iii. cálculo das capacidades compartimentais;
- iv. cálculo da fugacidade inicial;
- v. cálculo da concentração inicial de contaminante presente em cada compartimento;
- vi. cálculo dos parâmetros de desaparecimento por reacção;
- vii. cálculo da constante cinética;
- viii. cálculo dos parâmetros de desaparecimento por advecção;
- ix. cálculo das fugacidades ao longo do tempo;
- x. cálculo da quantidade de contaminante aniquilada ao longo do tempo;
- xi. cálculo da concentração de contaminante presente em cada compartimento ao longo do tempo;

Os ensaios de bio-ventilação inoculados foram modelados utilizando um modelo de Nível 2b (Mackay, 2001), considerando que se trata de um sistema em equilíbrio com sumidouros (aniquilação por advecção e por bio-degradação) em estado transiente. A aplicação deste modelo engloba treze passos fundamentais:

- i. definição da geometria do sistema;
- ii. definição de parâmetros intrínsecos ao solo e aos contaminantes
- iii. cálculo das capacidades compartimentais;
- iv. cálculo da fugacidade inicial;
- v. cálculo da concentração inicial de contaminante presente em cada compartimento;
- vi. cálculo dos parâmetros de desaparecimento por reacção (bio-degradação);
- vii. cálculo da constante cinética;
- viii. cálculo dos parâmetros de desaparecimento;
- ix. cálculo das fugacidades ao longo do tempo;
- x. cálculo da quantidade de contaminante aniquilada ao longo do tempo;
- xi. cálculo da concentração de contaminante presente em cada compartimento ao longo do tempo;
- xii. cálculo do consumo teórico de oxigénio com base na razão estequiométrica;
- xiii. cálculo da emissão teórica de dióxido de carbono com base na razão estequiométrica

A aplicação destes modelos considerou os seguintes pressupostos:

- i) processo isotérmico;
- ii) as reacções que ocorrem são de cinética de 1ª ordem ou de pseudo 1ª ordem;
- iii) não há bio-degradação dos contaminantes no compartimento ambiental “ar”;
- iv) a concentração de contaminante está sempre em equilíbrio em todos os compartimentos ambientais, o que implica que qualquer variação na fugacidade é instantaneamente reflectida nas concentrações de contaminante em todos os compartimentos;
- v) o volume de água no sistema é constante, o que se perde ou evapora é compensado pelo que se produz na bio-degradação.

As metodologias de cálculo apresentadas exigem a determinação e cálculo de um número significativo de parâmetros; as expressões utilizadas no seu cálculo são, seguidamente, apresentadas nas Equações 2.16 a 2.41.

Equação 2.16: $V_t = A \times h$

Equação 2.17: $V_s = M_{soil} \div \rho_{mm}$

Equação 2.18: $H_v = \frac{V_w}{V_t}$

Equação 2.19: $N_t = \frac{V_t - V_s}{V_t}$

Equação 2.20: $V_w = V_t \times H_v$

Equação 2.21: $V_{gas} = V_t \times (N_t - H_v)$

Equação 2.22: $V_{mo} = V_t \times \frac{\text{Fracção de CO no solo}}{\text{Fracção de CO na mo}}$

Equação 2.23: $V_{mm} = V_t - V_w - V_{gas} - V_{mo}$

Equação 2.24: $K_{mo} = K_{co} \times \text{Fracção de CO na mo}$

Equação 2.25: $K_{mm} = K_{co} \times \text{Fracção de AR no solo}$

Equação 2.26: $Z_g = \frac{1}{R \times T}$

Equação 2.27: $Z_w = \frac{1}{H}$

Equação 2.28: $Z_{mo} = \frac{K_{mo} \times \rho_{mo}}{H}$

Equação 2.29: $Z_{mm} = \frac{K_{mm} \times \rho_{mm}}{H}$

Equação 2.30: $f_0 = \frac{M_0}{\sum V_i Z_i}$

Equação 2.31: $C_{gas} = Z_g \times f_0$

Equação 2.32: $C_w = Z_w \times f_0$

Equação 2.33: $C_{mo} = Z_{mo} \times f_0$

Equação 2.34: $C_{mm} = Z_{mm} \times f_0$

Equação 2.35: $D_r = V_t \times Z_{TP} \times \frac{\ln 2}{SV}$

Equação 2.36: $K_C = \frac{D_r}{\sum V_i Z_i}$

Equação 2.37: $f_i = f_0 \times \exp (-K_C \times t_i)$

Equação 2.38: $Cg_i = Z_g \times f_i$

Equação 2.39: $Cw_i = Z_w \times f_i$

Equação 2.40: $Cmo_i = Z_{mo} \times f_i$

Equação 2.41: $Cmm_i = Z_{mm} \times f_i$

onde: A é a área da base da coluna em m^2 ; h é a altura de solo na coluna em m ; M_{soil} é a massa de solo seco em kg ; V_t é o volume de solo a granel em m^3 ; V_s é o volume de solo seco em m^3 ; V_w é o volume de água em m^3 ; V_{gas} é o volume da fase gasosa em m^3 ; V_{mo} é o volume de matéria orgânica em m^3 ; V_{mm} é o volume de matéria mineral activa em m^3 ; H_v é a humidade volumétrica; N_t é a porosidade volumétrica total do solo; CO é o carbono orgânico; mo é a matéria orgânica; AR é a argila; H é a constante da lei de Henry; R é a constante universal dos

gases perfeitos ($8,314 \text{ m}^3 \text{Pa K}^{-1} \text{mol}^{-1}$); K_{co} é o coeficiente de partilha do carbono orgânico em $L \text{ kg}^{-1}$; K_{mo} é o coeficiente de partilha matéria orgânica-água em $L \text{ kg}^{-1}$; K_{mm} é o coeficiente de partilha matéria mineral activa-água em $L \text{ kg}^{-1}$; K_s é o coeficiente de partilha solo-água em $L \text{ kg}^{-1}$; Z_g é a capacidade compartimental da fase gasosa em $\text{mol m}^{-3} \text{Pa}^{-1}$; Z_w é a capacidade compartimental da água em $\text{mol m}^{-3} \text{Pa}^{-1}$; Z_{mo} é a capacidade compartimental da matéria orgânica em $\text{mol m}^{-3} \text{Pa}^{-1}$; Z_{mm} é a capacidade compartimental da matéria mineral activa em $\text{mol m}^{-3} \text{Pa}^{-1}$; Z_{TP} é o total ponderal das capacidades compartimentais em $\text{mol m}^{-3} \text{Pa}^{-1}$; M_0 é massa inicial de contaminante em mol ; M_i é a massa de contaminante no instante de tempo i em mol ; t é o tempo em h ; T é a temperatura absoluta; f_o é a fugacidade inicial em Pa ; f_i é a fugacidade no instante de tempo i em Pa ; C_{gas} é a concentração de contaminante na fase gasosa em mol m^{-3} ; C_w é a concentração de contaminante na água em mol m^{-3} ; C_{mo} é a concentração de contaminante na matéria orgânica em mol m^{-3} ; C_{mm} é a concentração de contaminante na matéria mineral activa em mol m^{-3} ; C_s é a concentração de contaminante no solo em mol m^{-3} ; C_{gi} é a concentração de contaminante na fase gasosa no instante de tempo i em mol m^{-3} ; C_{wi} é a concentração de contaminante na água no instante de tempo i em mol m^{-3} ; C_{moi} é a concentração de contaminante na matéria orgânica no instante de tempo i em mol m^{-3} ; C_{mmi} é a concentração de contaminante na matéria mineral activa no instante de tempo i em mol m^{-3} ; K_C é a constante cinética em h^{-1} ; SV é a semivida em h ; Dr é o parâmetro de desaparecimento por reacção em $\text{mol Pa}^{-1} h^{-1}$; ρ_{mo} é a massa volúmica da matéria orgânica em kg m^{-3} e ρ_{mm} é a massa volúmica da matéria mineral em kg m^{-3} .

3. RESULTADOS

3.1. CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS

3.1.1. SOLO CONTAMINADO UTILIZADO COMO FONTE DE INÓCULO (BSOIL)

Na zona de implantação dos depósitos de crude da refinaria onde foram colhidas as amostras de BSoil, encontra-se um maciço granítico de grão médio, às vezes fino, de duas micas (γ'_3 - Granito do Porto) subjacente a solos de cobertura. Segundo A. Fiúza, os solos de cobertura desta zona são essencialmente de dois tipos: solos residuais graníticos resultantes da alteração do substrato rochoso e solos constituídos por um depósito arenoso semi-alóctone, resultantes dos sucessivos aterros levados a cabo quando da construção da refinaria (Vila, 2004). As amostras de BSoil foram obtidas nas bacias de retenção dos tanques de armazenamento, nas quais predominam, à superfície, os aterros arenosos. Na Figura 3.1 apresenta-se uma visão macroscópica das amostras obtidas.



Figura 3.1 - Visão macroscópica das amostras de BSoil (BSoil1 e BSoil2)

Na Tabela 3.1 encontram-se sintetizados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das amostras, da análise de carbono total (TC), carbono inorgânico (IC), carbono orgânico total (TOC), hidrocarbonetos petrolíferos totais (TPH), teores de azoto (N) e de fósforo (P).

Tabela 3.1 – Propriedades dos solos contaminados com crude (BSoil).

Solo	TC (%)	IC (%)	TOC (%)	TPH (g kg ⁻¹)	N (%)	P (%)
BSoil1	11,00	<LOD(*)	11,00	14,70	0,14	0,03
BSoil2	1,33	<LOD(*)	1,33	2,96	0,05	0,04

(*) LOD – limite de detecção

Os resultados obtidos permitiram verificar que os teores em carbono orgânico e em hidrocarbonetos petrolíferos totais foram muito superiores na amostra BSoil1. As análises para determinação de azoto e fósforo revelaram proporções de Carbono:Azoto:Fósforo (C:N:P) de 120:1,53:0,33 e 120:4,51:3,61, respectivamente para BSoil1 e BSoil2.

Comparando estes valores com os normalmente considerados óptimos (C:N:P = 120:10:1) (Kuo, 1999), verificou-se que o BSoil1 era deficitário em azoto e fósforo e o BSoil2 deficitário em azoto e excedentário em fósforo.

No decurso dos trabalhos verificou-se que estas diferenças entre as amostras não influenciaram os estudos já iniciados uma vez que o consórcio microbiano resultante das culturas de enriquecimento realizadas foi semelhante nas formas, cores e dimensões das colónias (Figura 3.2).

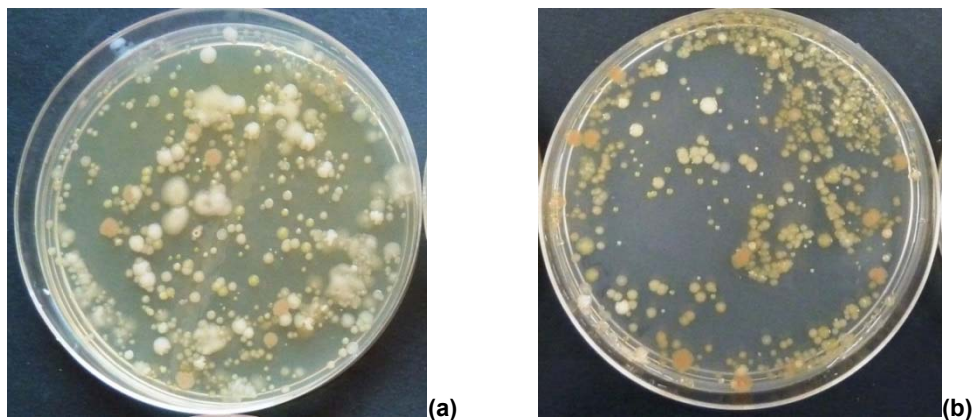


Figura 3.2 – Consórcio microbiano obtido a partir das amostras de BSoil (diluição de 10^{-3}). (a) BSoil1; (b) BSoil2.

A quantificação da população microbiana autóctone foi realizada em quatro provetes, dois de BSoil1 e dois de BSoil2. Os resultados apresentados na Figura 3.3 revelaram que a população microbiana era semelhante em número, em ambas as amostras.

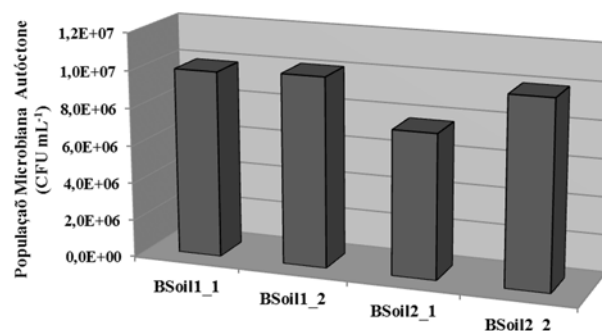


Figura 3.3 – Quantificação da população microbiana autóctone de BSoil.

3.1.2. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS GRANÍTICO, CALCÁRIO E XISTOSO

O conhecimento das características geológicas, físicas e químicas dos solos adquire papel relevante na problemática de remediação de solos. Os resultados obtidos na caracterização de solos descrita em 2.2.2 são seguidamente apresentados e discutidos.

3.1.2.1. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

Do ponto de vista geológico, os solos utilizados nos ensaios (SR, CL e XT) representam unidades litológicas com relevância ao nível do território português.

O solo residual granítico (SR) foi colhido na freguesia de Leça do Balio (Matosinhos), no seio da unidade geológica designada por “Granito do Porto” (γ_3'); trata-se de um granito alcalino de duas micas (moscovite e biotite) de grão médio, por vezes fino (Pereira et al., 1992). Esta formação geológica encontra-se profundamente alterada em vastas áreas, apresentando-se oxidada e com intensa caulínização dos feldspatos. Na Figura 3.4 apresenta-se um excerto da carta geológica à escala 1/200000 e uma sobreposição do excerto da carta geológica à imagem de satélite, na qual se localiza a zona de amostragem.

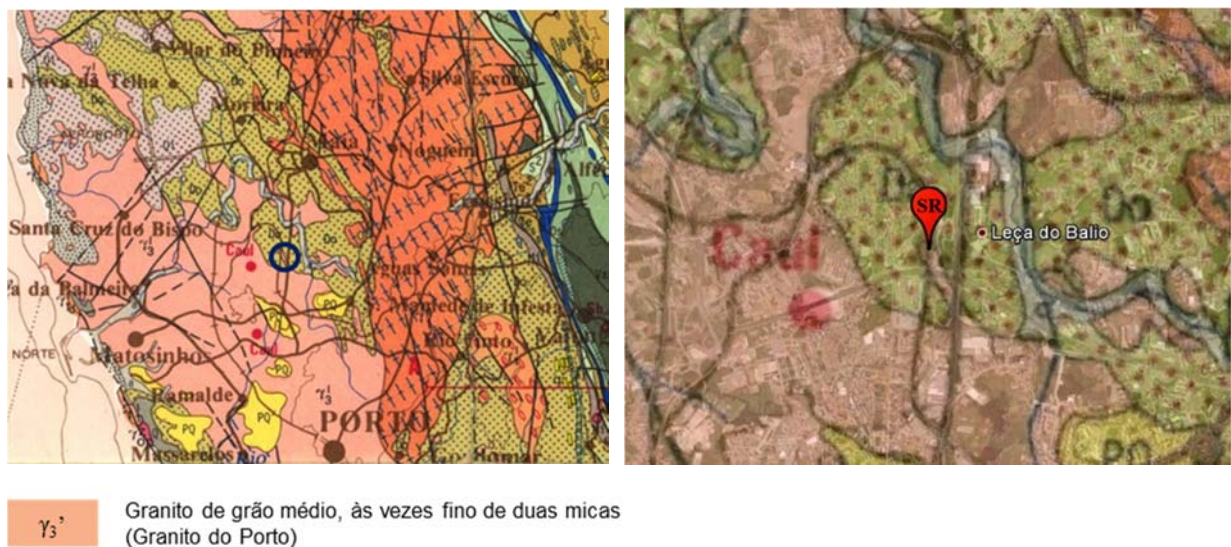


Figura 3.4 – Localização da amostragem de solo residual granítico (SR) num excerto da Carta Geológica de Portugal à escala 1/200000 – Folha 1 (Pereira et al., 1992).

A análise mineralógica do solo residual granítico por difracção de Raios X (Anexo I) revelou a presença de caulinite (69 a 75 %), moscovite (12 a 17 %), montmorilonite (11%), quartzo (6 a 16 %), feldspatos potássicos (1 %) e hematite (5 %). Os resultados obtidos revelaram-se surpreendentes uma vez que o perfil mineralógico obtido é bastante atípico, de salientar:

- ✓ a quase inexistência de feldspatos, só detectáveis em amostra selectiva da fracção mais grosseira e mesmo assim revelando elevada triclinicidade;

- ✓ reduzido teor em quartzo;
- ✓ elevadíssima quantidade de minerais de argila

Este perfil mineralógico, confirmado pela realização dos ensaios em dois laboratórios distintos, sugeriu a existência de alterações policíclicas, em que numa primeira fase ocorreu alteração hidrotermal caracterizada por albitização e moscovitização e posteriormente, numa 2ª fase, ocorreu alteração supergénica com caulinitização intensiva muito penetrativa; neste processo também se verificou perda de sílica porque, como o edifício rochoso colapsa, o quartzo perde o comportamento matricial acabando por ser lixiviado. Estas alterações policíclicas estão frequentemente associadas a importantes corredores de cisalhamento.

O calcário margoso (CL) foi colhido na freguesia de Souselas (Coimbra), no seio da unidade geológica J_g^1 ; esta unidade litoestratigráfica é constituída por uma série de margas e calcários margosos tenros (Barbosa et al., 2008). A amostra CL é do tipo calcário margoso. Na Figura 3.5 apresenta-se um excerto da carta geológica à escala 1/500000 e uma sobreposição do excerto da carta geológica à imagem de satélite, com localização da zona de amostragem.



Figura 3.5 - Localização da amostragem de subsolo calcário (CL) num extracto da Carta Geológica de Portugal à escala 1/500000 (Oliveira et al., 1992).

A análise mineralógica do calcário, cujos difratogramas são apresentados no Anexo I, revelou a presença de calcite (73 a 77 %), caulinite (4 a 7 %), mica (9 a 10 %), quartzo (3 a 5 %) e hematite (6 %). Esta composição mineralógica era a expectável neste tipo de formações.

O xisto (XT) foi colhido na freguesia de Folhadela (Vila Real), no seio da unidade geológica designada por “Formação de Pinhão” (Ribeiro et al., 2006). Esta unidade geológica, constituída por uma sequência finamente estratificada de cor verde, é caracterizada pela alternância de leitos psamíticos (quartzosos) e pelíticos (filitos) que correspondem ao par “metaquartzovaques – filito clorítico” (Bernardo de Sousa et al., 1989). A amostra XT é do

tipo filito clorítico. Na Figura 3.6 apresenta-se um excerto da carta geológica à escala 1/200000 e uma sobreposição do excerto da carta geológica à imagem de satélite, na qual se localiza a zona de amostragem.

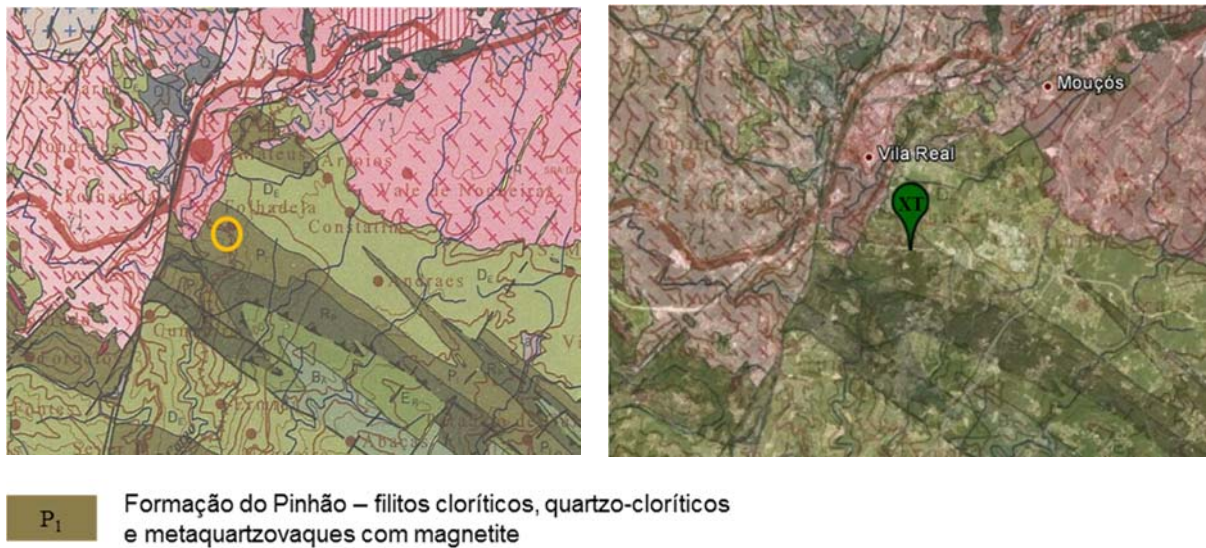


Figura 3.6 - Localização da amostragem de subsolo xistoso (XT) num excerto da Carta Geológica de Portugal à escala 1/200000 – Folha 2 (Ribeiro et al., 2006).

A análise mineralógica do xisto, cujos difratogramas são apresentados no Anexo I, revelou a presença de clorite (46 a 50 %), mica (39 %), quartzo (6 a 10 %) e feldspatos sódicos (5 %).

Na Figura 3.7 apresenta-se uma visão macroscópica das amostras dos três subsolos utilizados nos ensaios.



Figura 3.7 - Visão macroscópica das amostras de solo residual granítico (SR), solo de calcário margoso (CL) e solo de xisto clorítico (XT).

3.1.2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E FÍSICA

Os resultados obtidos na análise granulométrica por peneiração e sedimentação são apresentados no Anexo I e estão sintetizados na Figura 3.8.

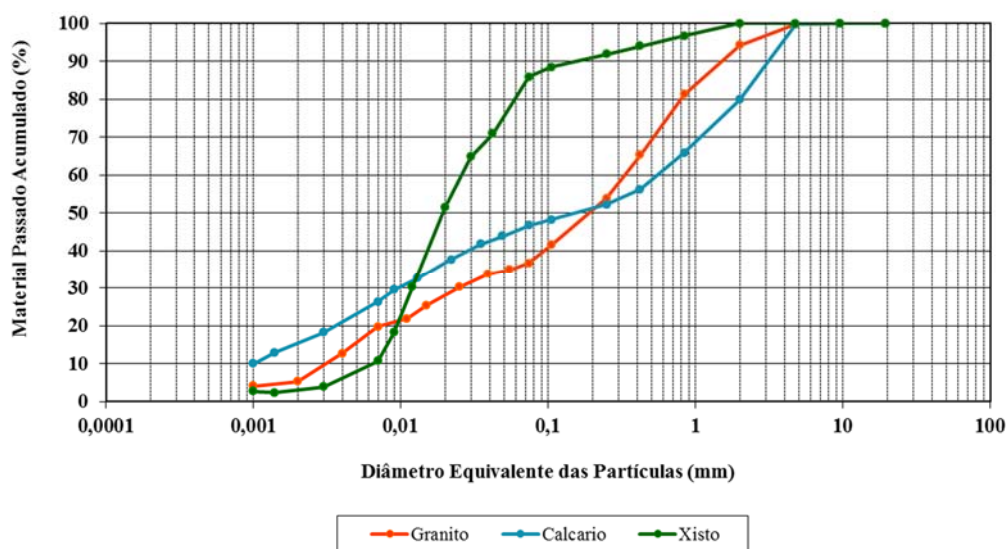


Figura 3.8 – Curvas granulométricas dos solos em estudo.

A análise granulométrica revelou que os solos estudados apresentavam granulometria extensa. O solo residual granítico era um solo predominantemente arenoso (59 % de areia), com 6 % de seixo, 28% de silte e 7 % de argilas. O solo calcário apresentava maior percentagem de argila (15 %), de silte (30 %) e de cascalho (20 %) e menor percentagem de areia (35 %). O solo de xisto, devido à sua natureza evolutiva, apresentava uma granulometria mais fina, sendo um solo predominantemente siltoso (79 %), com 18 % de areia e 3% de argilas.

Os resultados obtidos na caracterização geotécnica dos solos SR, CL e XT são apresentados no Anexo I. Na Tabela 3.2 é feita uma síntese dos resultados obtidos nessa caracterização.

Os limites de consistência apontaram para finos com baixa plasticidade, tanto no solo granítico (IP= 7 %) como no solo calcário (IP = 9 %). Embora a diferença de plasticidade fosse muito pequena verificou-se, através da representação na Carta de Plasticidade de Casagrande, que os finos do solo residual granítico se classificavam como siltes de baixa plasticidade (ML), enquanto os finos do solo calcário se classificavam como argilas de baixa plasticidade (CL). O solo de xisto tinha, como já foi referido, uma percentagem de finos muito elevada (82 %), no entanto estes apresentavam comportamento não plástico. A fracção argilosa presente no solo residual granítico apresentava actividade normal (0,75 – 1,25), enquanto a do solo calcário, embora mais abundante, se apresentava pouco activa (< 0,75).

Tabela 3.2 – Caracterização geotécnica dos solos granítico (SR), calcário (CL) e xisto (XT).

	SR	CL	XT		SR	CL	XT
Argila (%)	7	15	3	Passados # 4 (%)	100	100	100
Silte (%)	28	30	79	D ₁₀ (mm)	0,003	0,001	0,007
Areia (%)	60	35	18	D ₃₀ (mm)	0,025	0,01	0,012
Seixo (%)	5	20	0	D ₅₀ (mm)	0,2	0,16	0,019
Limite de Liquidez (%)	30	24	NP	D ₆₀ (mm)	0,34	0,58	0,027
Limite de Plasticidade (%)	23	15	NP	D _{máx} (mm)	4,76	4,76	0,84
Índice de Plasticidade (%)	7	9	NP	Coefficiente de Uniformidade	113,3	580,0	3,9
Passados # 200 (%)	37	47	86	Coefficiente de Curvatura	0,6	0,2	0,8
Passados # 10 (%)	94	80	100	Actividade das Argilas	1	0,6	--

Na Figura 3.9 apresenta-se a Carta de Plasticidade de Casagrande, com representação dos solos granítico e calcário, e a classificação granulométrica dos solos, aplicando o Triângulo de Feret.

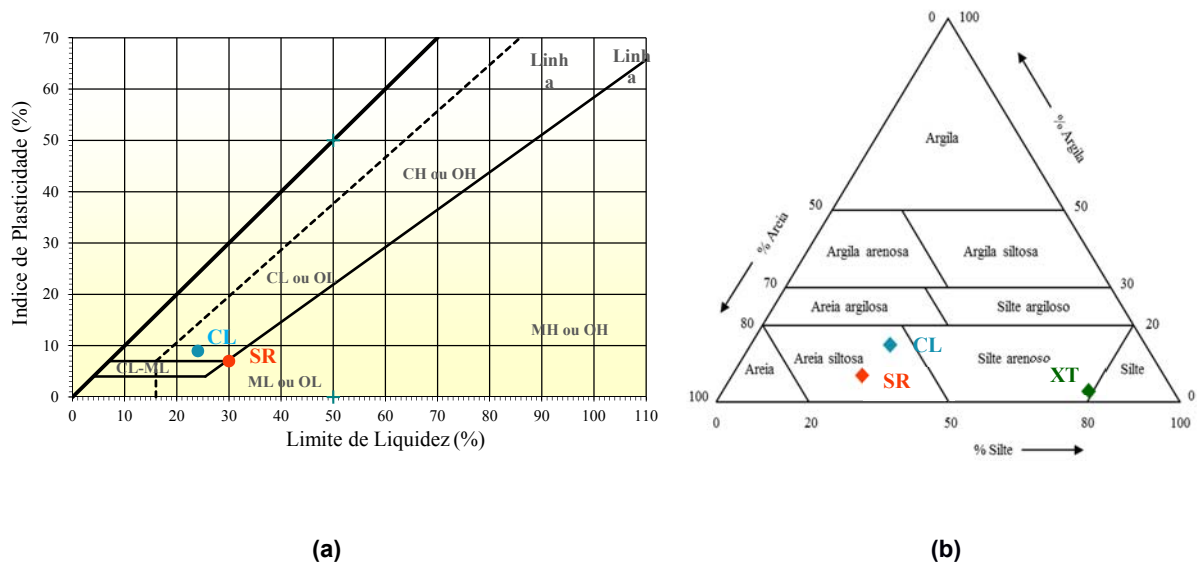


Figura 3.9 – (a): Representação do solo granítico (SR) e do calcário (CL) na Carta de Plasticidade de Casagrande. (b): Representação do solo granítico (SR), do calcário (CL) e do xisto XT) no Triângulo de Feret.

Segundo a classificação granulométrica de Feret, o solo residual granítico e o calcário eram areias siltosas e o solo de xisto um silte arenoso. Considerando a caracterização granulométrica e a plasticidade, os solos foram classificados de acordo com a Norma ASTM D2487-85 - Classificação Unificada de Solos (Matos Fernandes, 2006), sendo os resultados obtidos apresentados na Tabela 3.3. Comparando os resultados obtidos com a aplicação das duas classificações, verificou-se concordância, pelo que serão futuramente adoptados os resultados da Classificação Unificada, uma vez que esta classificação é mais completa, considerando não só a granulometria, mas também a plasticidade dos materiais.

Tabela 3.3 - Classificação dos Solos segundo a Norma ASTM D2487-85

Solo	Classificação ASTM
SR	SM - areia siltosa
CL	SC - areia argilosa
XT	ML - silte

Os resultados obtidos na caracterização física dos solos estão sintetizados na Tabela 3.4. Tal como já foi referido no Capítulo 2, foram determinados a densidade das partículas (G), a massa volúmica dos solos secos (ρ) e a porosidade (η) dos solos secos, a massa volúmica dos solos húmidos (determinada após a adição de água, de acordo com os teores em água utilizados nos ensaios de remediação: 25 % no granito, 11% no calcário e 14,5 % no xisto), (ρ'), o coeficiente de permeabilidade (k) e o teor em água de saturação dos solos: teórico (W_{St}) e experimental (W_{Se}).

Tabela 3.4 - Caracterização física dos solos SR, CL e XT.

Solo	G	ρ (kg m ⁻³)	η (%)	ρ' (kg m ⁻³)	k (m s ⁻¹)	W_{St} (%)	W_{Se} (%)
SR	2,68	1060	60	1160	7,91 E-6	45,7	46,5
CL	2,73	1530	44	1500	7,57 E-6	26,4	20,1
XT	2,80	1480	47	1410	9,88 E-6	30,8	29,3

Os valores obtidos revelaram diferenças significativas na massa volúmica e consequentemente nos valores da porosidade do granito e dos outros dois solos; o baixo valor de massa volúmica obtido para o granito está relacionado com a sua intensa meteorização, estando em concordância com a composição mineralógica obtida. Estes resultados justificaram o facto de as amostras de CL e XT saturarem para valores de teor em água muito inferiores, o que condicionou os teores em humidade dos solos utilizados nos ensaios de remediação. No solo granítico, considerando os baixos valores obtidos para as massas

volúmicas, foi ainda determinada a baridade máxima teórica com base na norma LNEC E197-1966, tendo-se obtido o valor de $1,82 \text{ g cm}^{-3}$ para um teor em água óptimo de 11,8 %, o que também apontou para materiais muito alterados.

O coeficiente de permeabilidade apresentou a mesma ordem de grandeza em todos os solos (10^{-6} m s^{-1}), apontando para materiais permeáveis com baixo grau de permeabilidade, o que é característico das areias siltosas e siltes. Estes valores de permeabilidade viabilizaram a aplicação da bio-ventilação.

Os teores em água dos solos utilizados nos ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação corresponderam a cerca de 50% do teor em água de saturação determinado experimentalmente. A adopção deste valor teve como objectivo proporcionar humidade suficiente para garantir o desenvolvimento dos microrganismos, mantendo um volume significativo de vazios preenchidos com ar para que durante a bio-ventilação o caudal introduzido circulasse e se distribuisse com facilidade.

3.1.2.3. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A caracterização química dos solos constou da determinação dos compostos orgânicos maioritários, da perda ao rubro, do teor em hidrocarbonetos petrolíferos totais, dos conteúdos em carbono total, carbono inorgânico e carbono orgânico, dos conteúdos em azoto e fósforo, da condutividade e do pH. Na Tabela 3.5 apresenta-se a quantificação dos compostos inorgânicos maioritários presentes nos três solos utilizados nos ensaios e, na Tabela 3.6 apresentam-se os valores dos restantes parâmetros de caracterização química determinados.

Tabela 3.5 – Análise de compostos inorgânicos maioritários no granito (SR), no calcário (CL) e no xisto (XT)

Solo	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe (%)	MnO (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)
SR	50,72	23,64	7,02	0,08	0,10	2,29	<0,2	2,33	1,50	0,21
CL	11,14	2,74	1,73	0,03	44,85	1,2	<0,2	0,76	0,12	0,07
XT	59,43	19,90	7,15	0,08	0,10	2,22	1,44	4,28	0,89	0,09

Comparando os valores obtidos nas análises químicas com resultados publicados (Begonha, 1997; Jorge, 2003), verificou-se concordância nos resultados. No caso dos granitos, a perda de sílica, quando comparada com os valores obtidos numa amostra de granito “são” (não alterado), está relacionada com a composição mineralógica e o perfil de alteração apresentado por este material. No caso de XT, o elevado conteúdo em sílica foi justificado pela presença de leitos psamíticos (ricos em quartzo) característicos desta unidade litoestratigráfica.

Tabela 3.6 – Caracterização Química de SR, CL e XT.

Solo	TC (%)	IC (%)	TOC (%)	TPH (mg kg ⁻¹)	N (%)	P (%)	pH	Condutividade (μS cm ⁻¹)	Perda ao Rubro (%)
SR	0,396	< LOD	0,396	0,35	0,022	0,172	5,8	24,3	11,80
CL	10,566	9,914	0,651	0,46	0,017	0,068	6,8	295,0	37,23
XT	0,498	< LOD	0,498	0,55	0,013	0,055	6,1	67,1	4,07

Os resultados obtidos permitiram verificar que os teores em carbono orgânico (TOC) e em hidrocarbonetos petrolíferos totais (TPH) eram muito baixos, como seria de esperar em amostras não contaminadas e colhidas alguns metros abaixo da superfície do terreno, em escavações frescas. O calcário margoso apresentou teores elevados em carbono inorgânico (IC) e carbono total (TC), o que é inerente à sua natureza mineralógica.

As proporções carbono-azoto-fósforo obtidas foram: 120:6,7:52,1 no solo granítico, 120:3,1:12,5 no solo calcário e 120:3,1:13,3 no solo xistoso. Quando comparadas com as usualmente apontadas como ideais para a actividade biológica (120:10:1) (Kuo, 1999), verificou-se que os três solos eram deficitários em azoto e excedentários em fósforo.

Os valores de condutividade e pH dos solos ensaiados revelaram tratar-se de solos não salinos, sendo que, segundo (Jones, 2001), o CL era um solo neutro e os SR e XT eram solos ligeiramente ácidos.

Dos resultados apresentados salienta-se os elevados valores obtidos para a perda ao rubro nos solos SR e CL. No caso do solo granítico, este facto deverá estar relacionado com alterações na água de intercadas e estrutural existente nos minerais argilosos, os valores da perda ao rubro são normalmente bons indicadores do grau da alteração química e também da natureza e do teor global dos minerais argilosos presentes. No caso do CL há ainda a acrescentar a elevada perda ao rubro devido à presença de carbonatos. O baixo valor da perda ao rubro do xisto relaciona-se com os intensos fenómenos de metamorfismo a que este material já foi sujeito.

3.1.2.4. QUANTIFICAÇÃO DA POPULAÇÃO MICROBIANA AUTÓCTONE

A quantificação da população microbiana autóctone foi realizada em seis provetes, dois de SR, dois de CL e dois de XT. Os resultados apresentados na Figura 3.10 revelaram população microbiana semelhante nas duas réplicas do mesmo tipo de solo e quantidade reduzida de microrganismos autóctones. Isto deverá estar relacionado com o facto de as amostras não serem superficiais, apresentarem teores de matéria orgânica muito baixos e proporções C:N:P inadequadas. A amostra de calcário, obtida numa pedreira em exploração, era a que detinha população microbiana mais reduzida. Foi ainda quantificada a população microbiana presente

nos solos após esterilização, tendo-se verificado ausência total de microrganismos nos três solos esterilizados.

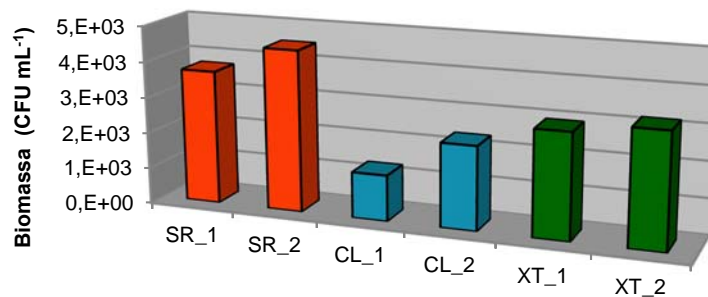


Figura 3.10 – Quantificação da população microbiana autóctone nos três solos em estudo: granito (SR), calcário (CL) e xisto (XT).

3.2. ANÁLISE

3.2.1. CROMATOGRAFIA DOS CONTAMINANTES

Foram traçadas curvas de calibração por cromatografia gasosa (GC-FID), onde se relacionaram as áreas dos picos com a concentração do respectivo padrão, tendo sido imposto a passagem da recta pela origem. As gamas de concentrações lineares apresentaram sensibilidade suficiente para efectuar as quantificações no decurso do trabalho experimental. Nas Tabelas 3.7 e 3.8 apresentam-se os parâmetros relativos às rectas de calibração, construídas indicando o intervalo de linearidade, o declive das rectas, o coeficiente de determinação (R^2), o tempo de retenção (t_{ret}), o limite de detecção (LOD) e o limite de quantificação (LOQ). Os limites de detecção e de quantificação foram determinados em termos do desvio-padrão de dez medidas de padrões com baixa concentração (Miller et al., 2005). No Anexo II são apresentadas as curvas de calibração e os dados experimentais utilizados na sua construção.

Como se pode verificar pelos valores apresentados, todos os ajustes possuem coeficientes de determinação elevados, superiores a 0,995, excepto para uma das curvas traçadas para o xileno (0,993); considerando que o número mínimo de padrões analisados foi 8, o valor mínimo de graus de liberdade foi 6, deste modo os coeficientes obtidos apontam para níveis de confiança de 99 % (Snedecor et al., 1989).

Tabela 3.7 - Resumo dos parâmetros relativos às rectas de calibração (isotérmica a 200 °C) traçadas para a quantificação individual dos contaminantes

Contaminante	Intervalo de Linearidade (mg L ⁻¹)	Declive (u.a. mg ⁻¹ L)	R ²	t _{ret} (min)	LOD (mg L ⁻¹)	LOQ (mg L ⁻¹)
Benzeno	0,57 – 85,80	927679	0,9978	2,12	0,03	0,11
	0,30 – 41,48	836539	0,9983	2,12	0,04	0,12
	0,30 – 41,48	830232	0,9954	2,12	0,04	0,12
Tolueno	0,29 – 41,15	793285	0,9986	2,16	0,04	0,13
Etilbenzeno	0,29 – 40,96	1000000	0,9976	2,19	0,26	0,86
Xileno	0,56 – 51,75	538866	0,9990	2,22	0,21	0,68
	0,56 – 51,81	599722	0,9977	2,22	0,18	0,61
	0,29 – 52,30	601257	0,9982	2,22	0,18	0,61
	0,29 – 52,30	648301	0,9991	2,22	0,17	0,57
	0,59 – 41,15	873826	0,9930	2,22	0,13	0,42
BTEoX	0,29 – 41,15	909450	0,9961	2,18	0,09	0,31

Tabela 3.8 - Resumo dos parâmetros relativos às rectas de calibração (isotérmica a 40 °C) traçadas para a quantificação da mistura de contaminantes

Contaminante	Intervalo de Linearidade (mg L ⁻¹)	Declive (u.a. mg ⁻¹ L)	R ²	t _{ret} (min)	LOD (mg L ⁻¹)	LOQ (mg L ⁻¹)
Benzeno	0,07 – 25,93	961766	0,9994	3,14	0,03	0,10
Tolueno	0,07 – 25,72	933146	0,9991	5,82	0,04	0,13
Etilbenzeno	0,07 – 25,60	715294	0,9986	10,99	0,05	0,16
Xileno	0,07 – 25,42	677520	0,9987	13,85	0,05	0,17

3.2.2. RESPIROMETRIA (O₂ E CO₂)

A determinação das concentrações de oxigénio e dióxido de carbono na fase gasosa foram realizadas por respirometria; no presente trabalho foram utilizados três respirómetros cujas características foram apresentadas em 2.2.4.

O respirómetro Sable foi utilizado numa fase muito inicial dos trabalhos de investigação, em ensaios exploratórios; conduziu a resultados frequentemente pouco coerentes ou mesmo impossíveis, tendo-se concluído que, devido à longa idade, os seus sensores já não estariam a funcionar de forma adequada. Dada a antiguidade do equipamento e o elevado custo dos sensores, optou-se por adquirir um novo respirómetro.

O respirómetro Sensotec foi escolhido por permitir trabalhar em circuito fechado, registar em modo contínuo e devido à sua elevada precisão na determinação do oxigénio (possui como sensor um tubo cerâmico em zircónio). A escolha veio a revelar-se inapropriada; entre outros problemas menores relacionados com os caudais circulantes necessários ao registo estabilizado e contínuo de dados, a escolha da célula de zircónio revelou-se totalmente inadequada pois este sensor funciona a elevada temperatura (650 °C) pelo que os BTEX, presentes na fase gasosa, eram degradados ao passar pelo tubo de zircónio e deste modo não era possível controlar os níveis de contaminação e a bio-degradação dos contaminantes.

O respirómetro da marca Servomex, equipado com célula paramagnética para determinação do oxigénio, também revelou problemas no funcionamento em circuito fechado e modo contínuo, devido ao desaparecimento de contaminante. Acabou por se optar por realizar os ensaios de bio-ventilação em regime escalonado e a respirometria em circuito aberto; o ar que entrava no respirómetro não voltava a ser introduzido no reactor. Foi com este último respirómetro que foram realizados todos os ensaios de bio-ventilação que serão posteriormente apresentados.

Os resultados obtidos na análise respirométrica, realizada nos ensaios de bio-ventilação, serão apresentados e discutidos, conjuntamente com os restantes resultados, no subcapítulo 3.5.1.

3.3. DISTRIBUIÇÃO DOS CONTAMINANTES NOS SOLOS

As isotérmicas de equilíbrio elaboradas permitiram conhecer o modo como os contaminantes se distribuíram pelas diferentes fases dos solos. Tal como já foi referido em 2.2.5 construíram-se isotérmicas com benzeno, tolueno, etilbenzeno, xileno e com BTEoX, para SR (com 25 % de teor em água), para CL (com 11 % de teor em água) e para XT (com 14,5 % de teor em água), com gama de contaminação compreendida no intervalo 0,5 a 219,3 mg de contaminante por quilograma de solo húmido. A concentração dos contaminantes na fase gasosa, obtida directamente da amostra de gás recolhida no “head space” do reactor, foi quantificada por cromatografia gasosa; as concentrações dos contaminantes nas fases sólida e aquosa foram calculadas de acordo com o exposto em 2.2.5..

Nas Figuras 3.11, 3.12 e 3.13 é apresentada a evolução da distribuição dos contaminantes, benzeno (B), tolueno (T), etilbenzeno (E), xileno (X) e mistura BTEoX, nas fases gasosa (Figura 3.11), sólida (Figura 3.12) e aquosa (Figura 3.13) dos três solos estudados, em função da massa de contaminante adicionada ao sistema.

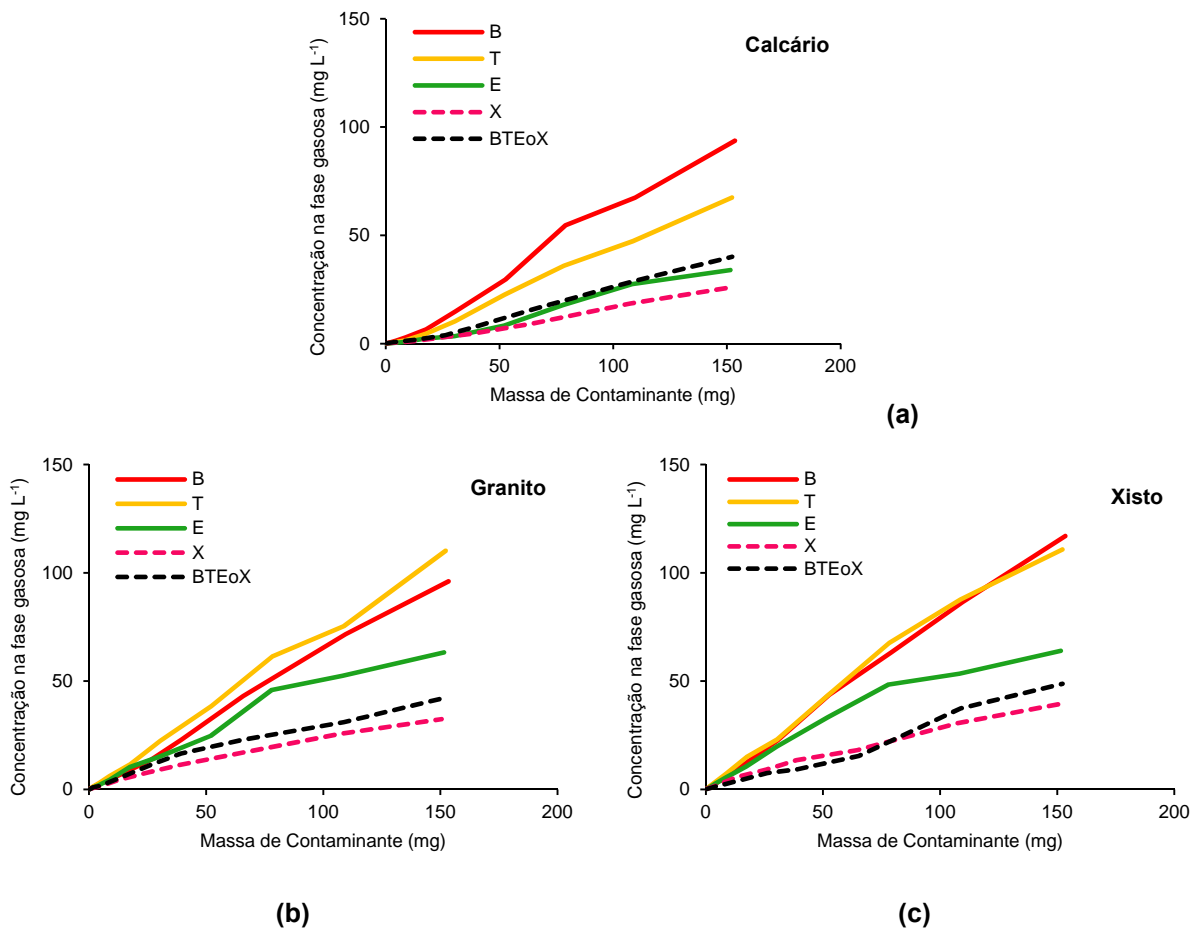


Figura 3.11 - Evolução da distribuição dos contaminantes: benzeno (B), tolueno (T), etilbenzeno (E), xileno (X) e mistura de benzeno, tolueno, etilbenzeno e o-xileno (BTEoX)) na fase gasosa dos solos estudados em função da massa de contaminante adicionada ao sistema: (a) Calcário; (b) Granito; (c) Xisto.

A análise dos resultados apresentados na Figura 3.11 permitiu verificar que:

- ✓ em todos os casos, a concentração dos contaminantes na fase gasosa era proporcional ao nível de contaminação;
- ✓ no calcário verificou-se que, para o mesmo nível de contaminação, a concentração de contaminante aumentava com a pressão de vapor do contaminante. No granito e no xisto verificou-se alguma perturbação nesta ordem uma vez que no granito há troca de posição entre o benzeno e o tolueno e no caso do xisto há uma quase sobreposição das concentrações de benzeno e tolueno;
- ✓ comparando as concentrações de contaminante na fase gasosa nos três solos, verifica-se que o xisto apresenta as maiores concentrações nesta fase, em particular para o benzeno e o tolueno, seguido pelo granito e por fim o calcário com as menores concentrações.

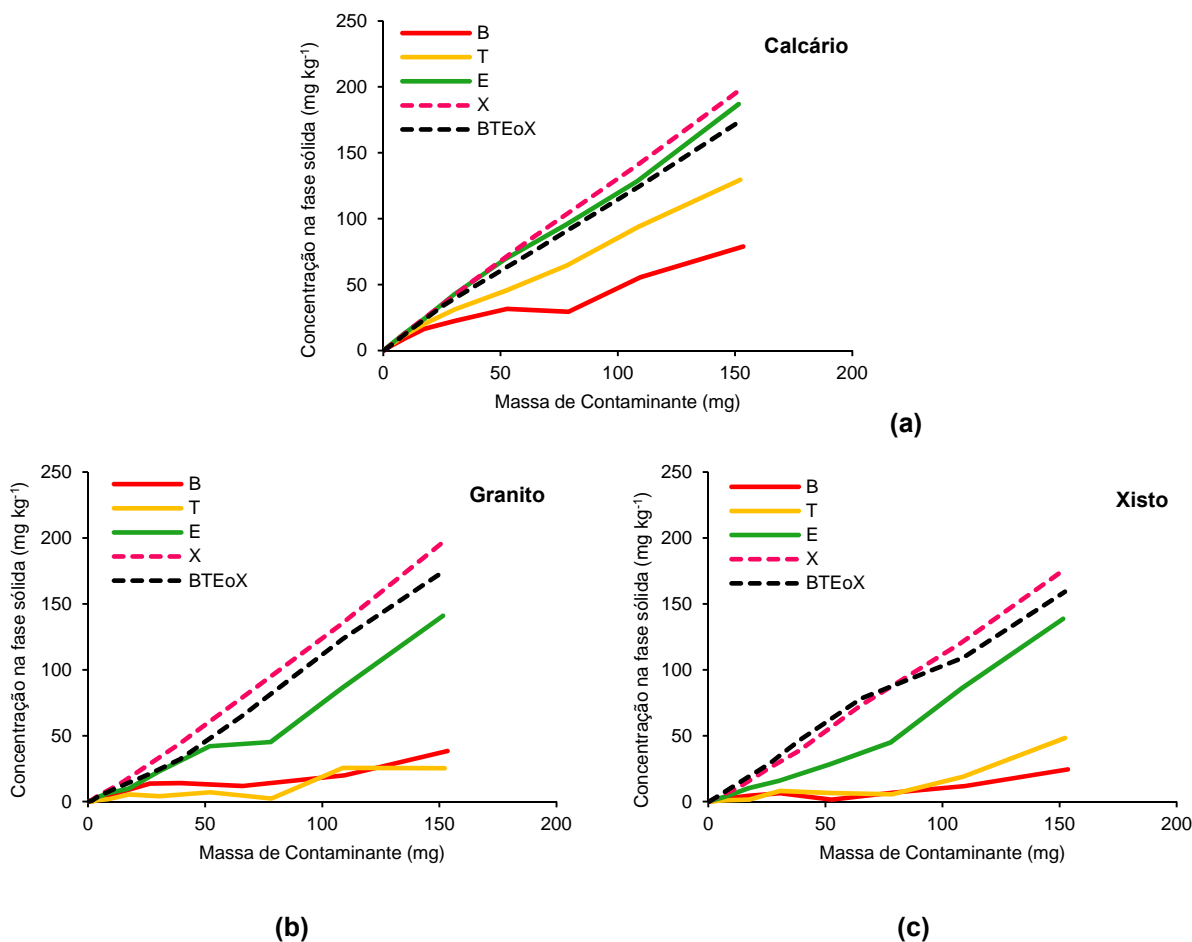


Figura 3.12 - Evolução da distribuição dos contaminantes: benzeno (B), tolueno (T), etilbenzeno (E), xileno (X) e mistura de benzeno, tolueno, etilbenzeno e o-xileno (BTEoX) na fase sólida dos solos estudados em função da massa de contaminante adicionada ao sistema: (a) Calcário; (b) Granito; (c) Xisto.

A análise dos resultados apresentados na Figura 3.12 permitiu verificar que:

- ✓ em todos os casos a concentração dos contaminantes na fase sólida era directamente proporcional ao nível de contaminação;
- ✓ a concentração de contaminante era inversamente proporcional à pressão de vapor do contaminante, constituindo excepção os casos do benzeno e o do tolueno, no granito e no xisto, em que se verificou quase sobreposição dos resultados;
- ✓ o calcário apresentou as maiores concentrações de contaminantes na fase sólida, denotando uma maior capacidade de sorção deste material relativamente ao granito e ao xisto. O xisto apresentou as menores concentrações nesta fase, revelando a menor capacidade de sorção, não sendo, no entanto, muito notória a diferença em relação ao granito.

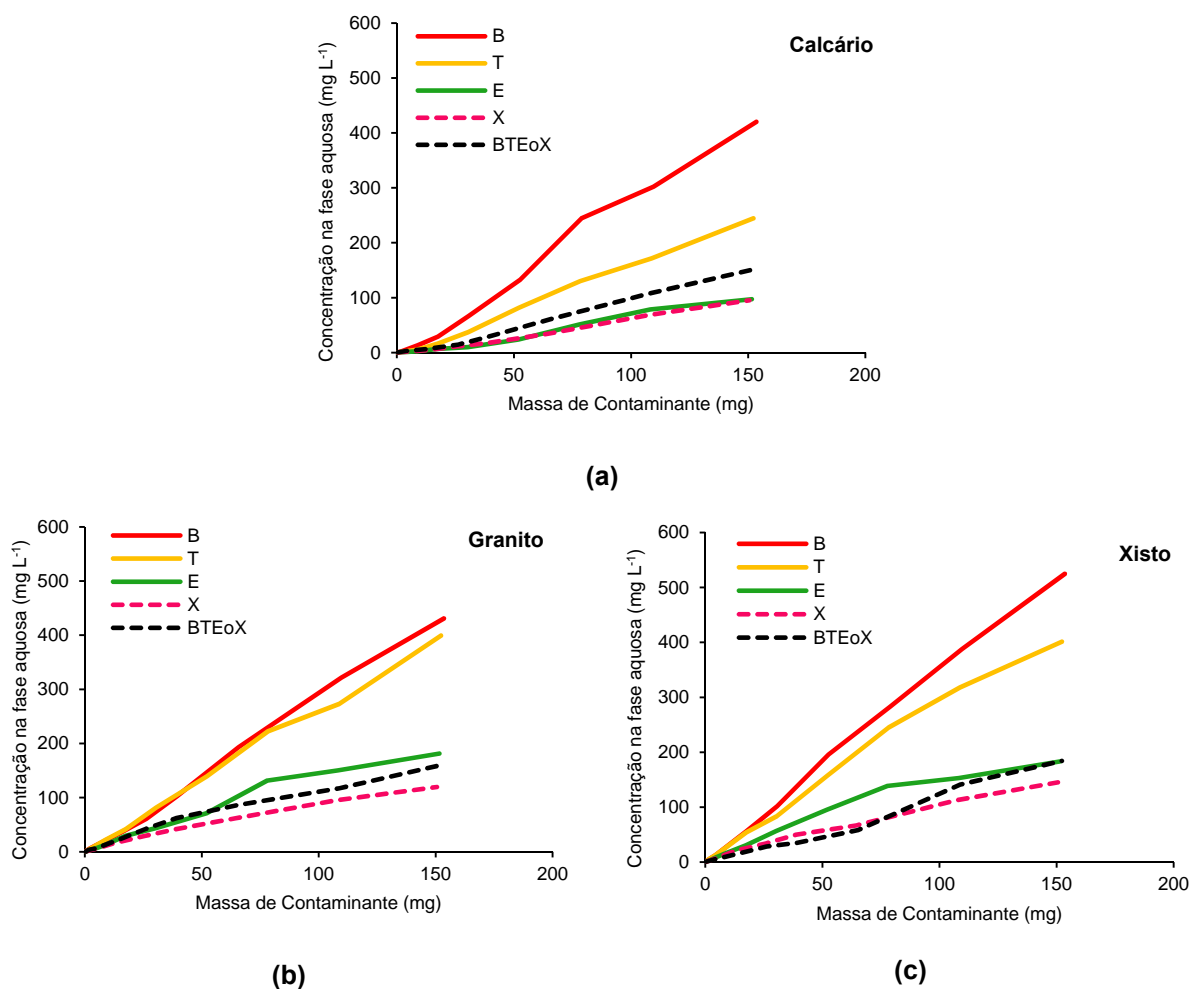


Figura 3.13 - Evolução da distribuição dos contaminantes: benzeno (B), tolueno (T), etilbenzeno (E), xileno (X) e mistura de benzeno, tolueno, etilbenzeno e o-xileno (BTEoX)) na fase aquosa dos solos estudados em função da massa de contaminante adicionada ao sistema: (a) Calcário; (b) Granito; (c) Xisto.

A análise dos resultados apresentados na Figura 3.13 permitiu verificar que:

- ✓ em todos os casos a concentração dos contaminantes na fase aquosa era directamente proporcional ao aumento do nível de contaminação;
- ✓ a concentração de contaminante na fase aquosa era proporcional à pressão de vapor e à solubilidade do contaminante, constituindo excepção o benzeno e o tolueno no granito, uma vez que se verificou comportamento similar nos níveis inferiores de contaminação;
- ✓ comparando as concentrações de contaminante nos três solos verificou-se que o xisto apresentava as maiores concentrações, seguindo-se o granito e por fim o calcário, com as menores concentrações nesta fase.

A análise conjunta dos resultados apresentados nas Figuras 3.11, 3.12 e 3.13 permitiu verificar que:

- ✓ no calcário, as menores concentrações de contaminante ocorreram na fase gasosa, com excepção do benzeno, cujas menores concentrações se verificaram na fase sólida;
- ✓ no calcário, a fase aquosa apresentou as maiores concentrações de benzeno e de tolueno e a fase sólida teve as maiores concentrações de etilbenzeno, xileno e BTEoX;
- ✓ no granito e no xisto, as menores concentrações dos contaminantes menos voláteis (etilbenzeno, xileno e BTEoX) ocorrem na fase gasosa, enquanto as menores concentrações dos contaminantes mais voláteis (benzeno e tolueno) apareceram na fase sólida;
- ✓ no granito e no xisto, as maiores concentrações de contaminante foram verificadas na fase aquosa, com excepção do xileno, cuja maior concentração ocorreu na fase sólida.

A variação da capacidade de sorção dos solos estudados poderá estar relacionada com a percentagem de fracção argilosa presente nesses solos. Verificou-se que o solo xistoso apresentava a menor fracção argilosa (3%) e também a menor capacidade de adsorção, enquanto o calcário tinha a maior fracção argilosa (15%) e também a maior capacidade de adsorção. O granito encontrava-se numa posição intermédia, tanto para a fracção argilosa (7%) como para a capacidade de adsorção.

Alguns autores referem diminuição da capacidade de retenção da fase sólida dos solos com o aumento do teor em água do solo, sendo este efeito mais notório no caso dos contaminantes mais voláteis e mais solúveis (Albergaria, 2010a). Nos casos estudados no presente trabalho, verificou-se que as características dos solos se sobrepuseram ao efeito do teor em água uma vez que, embora o solo com menor teor em água (calcário com 11 % de teor em água) tenha sido o que apresentou maior capacidade de adsorção, o solo com maior teor em água (granito com 25 % de teor em água) não foi o que apresentou menor capacidade de adsorção. Analisando a composição granulométrica dos solos estudados verifica-se que o calcário foi o que apresentou maior fracção argilosa (15%), enquanto o granito e o xisto apresentaram valores muito inferiores, 7 % e 3 % respectivamente; pode verificar-se a proporcionalidade entre a capacidade de adsorção da fase sólida e a fracção argilosa presente nos materiais. Também a composição mineralógica deverá ter influenciado a capacidade de adsorção uma vez que, tendo o granito utilizado teor em água muito superior ao dos outros dois solos testados, ele não apresentava a maior concentração de contaminante na fase aquosa. O granito apresenta na sua composição mineralógica elevada percentagem de caulinite. Esta argila tem grande capacidade de se ligar com as moléculas de água, reduzindo assim os possíveis locais para sorção de contaminante, mas também a quantidade de água não adsorvida pela fase sólida; a água adsorvida deverá apresentar menor capacidade de dissolver contaminante, o qual será adsorvido pelos minerais de argila presentes no solo.

Com o intuito de melhor compreender a distribuição dos contaminantes pelas diferentes fases dos solos, foram construídas as isotérmicas de equilíbrio e ajustados os modelos de

Freundlich e de Langmuir aos dados experimentais (Perry et al., 1984). Para cada par “solo – contaminante” foi traçada uma isotérmica, considerando a partilha do contaminante entre a fase sólida e a fase gasosa. Foram assim construídas 15 isotérmicas de equilíbrio, que se passam a apresentar na Figura 3.14.

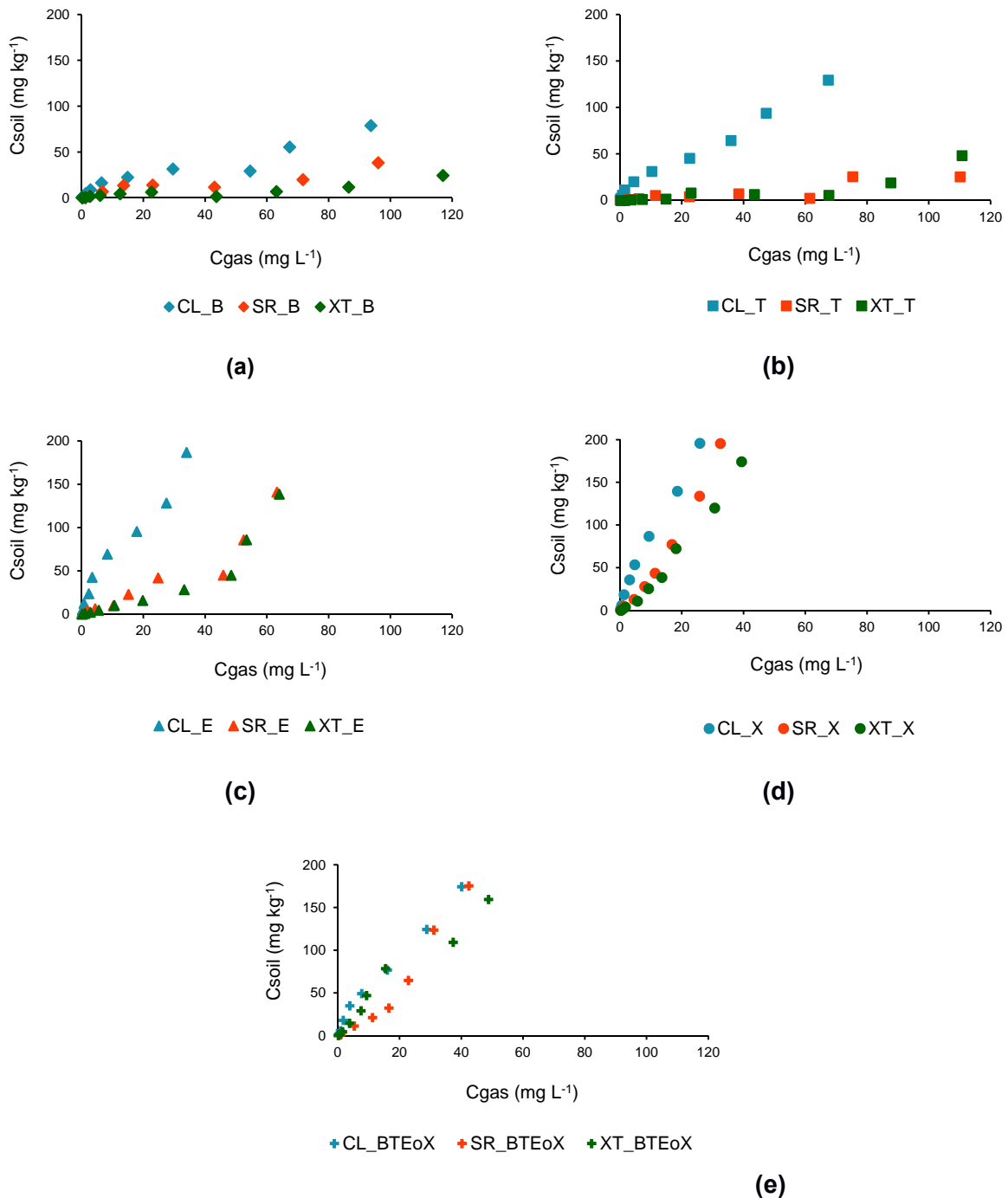


Figura 3.14 – Isotérmicas de equilíbrio em calcário (CL), granito (SR) e xisto (XT). (a) Benzeno (B), (b) Tolueno (T), (c) Etilbenzeno (E), (d) Xileno (X) (e) Mistura de benzeno, tolueno, etilbenzeno e o-xileno (BTEoX).

Os resultados obtidos nos ajustes dos valores experimentais aos modelos de adsorção de Freundlich e de Langmuir para cada solo e para cada contaminante são apresentados na Tabela 3.9; indicam-se os coeficientes de determinação (R^2), a constante de equilíbrio do modelo de Freundlich (K_F), a potência do ajuste de Freundlich (n), a constante de equilíbrio do modelo de Langmuir (K_L) e a capacidade máxima de adsorção do ajuste de Langmuir (b). Para o modelo de Langmuir foi aplicada uma regressão não linear de mínimos quadrados aos pontos experimentais (NLLS – Non Linear Least Squares), de acordo com o descrito nas considerações apresentadas no Anexo III.

Tabela 3.9 - Resultados obtidos no ajuste dos valores experimentais aos modelos de Freundlich e de Langmuir em calcário, granito e xisto.

		Intervalo de contaminação (mg kg ⁻¹)	Modelo de Freundlich (Equação 2.14)			Modelo de Langmuir (Equação 2.13)		
			R^2	K_F	n	R^2	K_L	b (mg kg ⁻¹)
Calcário	B	0,5 – 219,3	0,9623	2,9751	0,718	0,9053	0,0015	613,84
	T	0,5 – 217,5	0,9856	5,7099	0,732	0,9793	0,0034	675,00
	E	0,5 – 216,5	0,9732	10,7733	0,838	0,9624	0,0202	413,42
	X	0,5 – 215,0	0,9398	7,6410	1,110	0,9941	0,0197	561,79
	BTEoX	0,5 – 217,5	0,9194	4,2116	1,117	0,9876	0,0115	532,14
Granito	B	0,5 – 219,3	0,9163	0,3154	1,155	0,8698	0,0022	219,06
	T	0,5 – 217,5	0,8784	0,2187	0,970	0,7277	0,0027	99,37
	E	0,5 – 216,5	0,9832	1,5208	0,993	0,8761	0,0005	3205,86
	X	0,5 – 215,0	0,9737	1,5854	1,401	0,9598	0,0015	3600,97
	BTEoX	0,5 – 217,5	0,9814	1,2680	1,270	0,9234	0,0011	3500,56
Xisto	B	0,5 – 219,3	0,8852	0,5982	0,696	0,8464	0,0002	1115,47
	T	0,5 – 217,5	0,9385	0,0805	1,220	0,6819	0,0021	151,48
	E	0,5 – 216,5	0,9798	0,8462	1,084	0,8188	0,0006	2700,13
	X	0,5 – 215,0	0,9194	0,5985	1,640	0,9697	0,0010	4200,04
	BTEoX	0,5 – 217,5	0,9405	1,7216	1,299	0,9740	0,0140	367,99

A análise dos resultados permitiu verificar que:

- ✓ para o benzeno, o tolueno, o etilbenzeno e para as concentrações mais baixas de xileno, as isotérmicas do granito e do xisto foram muito próximas, o que evidenciou idêntica partição dos contaminantes;
- ✓ a maioria das isotérmicas traçadas não apresentou forma facilmente identificável com algum dos seis tipos definidos pela IUPAC, o que dificultou a compreensão dos fenómenos envolvidos na sorção;
- ✓ o modelo de Langmuir conduziu em algumas situações a valores de capacidade máxima de sorção (b) muito pouco prováveis, o que poderá ser justificado com o facto

de terem sido estudados baixos níveis de contaminação, conduzindo a ajustes pouco representativos do comportamento dos solos nos elevados níveis de contaminação;

- ✓ o modelo de Freundlich apresentou-se favorável na maioria das situações, conduzindo a coeficientes de determinação mais elevados (em 66,7 % dos casos), o que indicou maior adequabilidade deste modelo ao estudo de sorção em solos;
- ✓ no ajuste da equação de Freundlich verificou-se que os maiores valores da constante (K_F) ocorrem, para todos os contaminantes, no calcário. Sabendo que alguns autores (Chiou et al., 2002) consideram esta constante como uma medida da capacidade de adsorção de um adsorvente em condições unitárias de pressão, considerou-se que o calcário era o solo que apresentava maior capacidade de adsorção, o que deveria estar relacionado com a presença de maior quantidade de fracção argilosa;
- ✓ tal como já foi referido o granito e o xisto apresentavam tendencialmente capacidade de adsorção idêntica, aspecto que foi reforçado pela proximidade dos valores das constantes de Freundlich obtidos para cada contaminante; as capacidades de adsorção foram sempre baixas, apresentando-se ligeiramente superiores no granito com tolueno, etilbenzeno e xileno e no xisto com benzeno e BTEoX;
- ✓ comparando os valores do expoente (n) do modelo de Freundlich verificou-se, em todos os contaminantes, que o calcário apresentava os valores mais baixos, o que sugeriu menor propensão à adsorção; mais uma vez o granito e o xisto apresentaram comportamentos semelhantes, com excepção do benzeno, em que o granito apresentava um valor de n muito superior ao do xisto;
- ✓ no calcário predominaram os valores de n inferiores à unidade: 60 % dos casos inferiores à unidade e 40 % superiores à unidade, mas muito próximos desta;
- ✓ no granito e no xisto predominaram os valores de n superiores à unidade, respectivamente 60 % e 80 %;
- ✓ para cada solo, os maiores valores de n surgiram para os contaminantes menos voláteis, o que sugeriu maior propensão à adsorção destes contaminantes.

Considerando que valores superiores de K_F revelam maior capacidade de adsorção, que valores de n superiores a um correspondem a isotérmicas que revelam comportamento favorável à adsorção e valores de n inferiores a um indicam condições de adsorção desfavoráveis, (Chiou et al., 2002; Weber et al., 1996), o granito e o xisto revelaram menor capacidade de adsorção do que o calcário, mas apresentam condições mais favoráveis à sua ocorrência.

Globalmente, os resultados obtidos permitiram constatar que a adsorção dos contaminantes estudados nos solos testados não era favorável, o que deveria estar relacionado com o facto de possuírem quantidades reduzidas de fracção argilosa e matéria orgânica. As melhores condições de adsorção verificaram-se no caso dos contaminantes menos voláteis.

3.4. ENSAIOS EXPLORATÓRIOS

3.4.1. ESTUDOS DE BIO-DEGRADAÇÃO EM MEIO LÍQUIDO

Os estudos de bio-degradação realizados em meio líquido (MMA) tiveram como principais objetivos isolar e desenvolver o consórcio microbiano extraído de BSoil, adaptar os microrganismos aos contaminantes e avaliar a cinética da bio-degradação. Neste subcapítulo apresentam-se os resultados obtidos nesses ensaios. Os dados experimentais, obtidos e utilizados na análise seguidamente exposta, encontram-se no Anexo IV.

3.4.1.1. XILENO

Neste ponto são apresentados os resultados obtidos nos estudos cinéticos e de bio-degradação de xileno realizados em meio líquido. Na Figura 3.15 está representada a evolução no tempo das concentrações de xileno na fase gasosa, para todos os níveis de contaminação testados nas três transferências realizadas (a), o tempo necessário para, em cada caso, se atingir a concentração residual na fase gasosa de $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ (b) e a biomassa quantificada no final de cada ensaio (c).

Os resultados obtidos nesta primeira fase dos estudos permitiram verificar que:

- ✓ o consórcio microbiano não funcionou com nível de contaminação de 344 mg L^{-1} ; neste ensaio (1ª transferência) não se verificou redução significativa da concentração de xileno na fase gasosa nem crescimento microbiano;
- ✓ o consórcio microbiano degradou o xileno em todos os restantes níveis de contaminação, tendo-se em todos eles atingido a concentração residual na fase gasosa de $0,5 \text{ mg L}^{-1}$;
- ✓ a primeira transferência é, na maioria dos casos, mais lenta do que a segunda. Nas primeiras transferências, o tempo necessário para atingir a concentração residual na fase gasosa de $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ foi de 6 dias em 67 % dos casos e de 8 dias em 33 % dos casos, enquanto nas segundas transferências foi de 8 dias em 17 % dos casos, 6 dias em 33 % dos casos e 3 dias em 50 % dos casos;
- ✓ para o mesmo nível de contaminação, a biomassa desenvolvida é, quase sempre, superior na segunda transferência, ocorrendo maior crescimento para os níveis de contaminação 172 e 206 mg L^{-1} .

Com base nestes resultados, considerou-se que o nível de contaminação de 344 mg L^{-1} seria tóxico para o consócio microbiano e que os níveis de contaminação mais adequados para prosseguir os trabalhos seriam de 172 e 206 mg L^{-1} . Por questões de precaução, optou-se por alargar um pouco mais este intervalo, mantendo-se os ensaios para níveis de contaminação de 138, 172 e 206 mg L^{-1} .

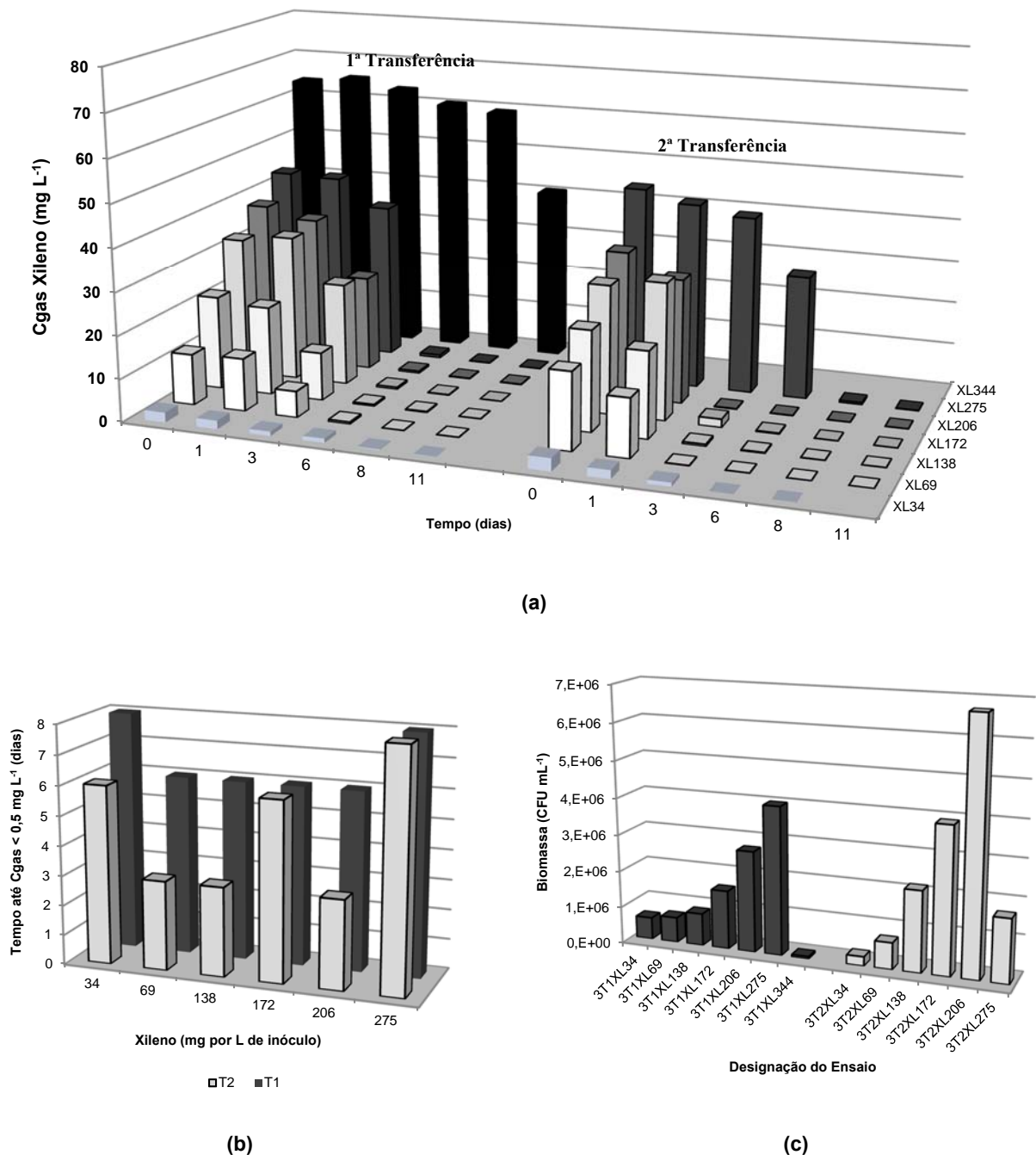


Figura 3.15 – Bio-degradação de xileno em meio líquido: (a) Evolução da concentração de xileno na fase gasosa. (b) Tempo necessário para atingir concentração na fase gasosa inferior a 0,5 mg L⁻¹. (c) Quantificação da biomassa no final dos ensaios.

Na Figura 3.16 apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos nos estudos de cinética da degradação do xileno para os níveis de contaminação seleccionados, encontra-se representada a evolução da concentração de xileno na fase gasosa nas três transferências realizadas (a), o tempo necessário para, em cada caso, se atingir a concentração residual na fase gasosa de 0,5 mg L⁻¹ (b) e a biomassa quantificada no final dos ensaios (c).

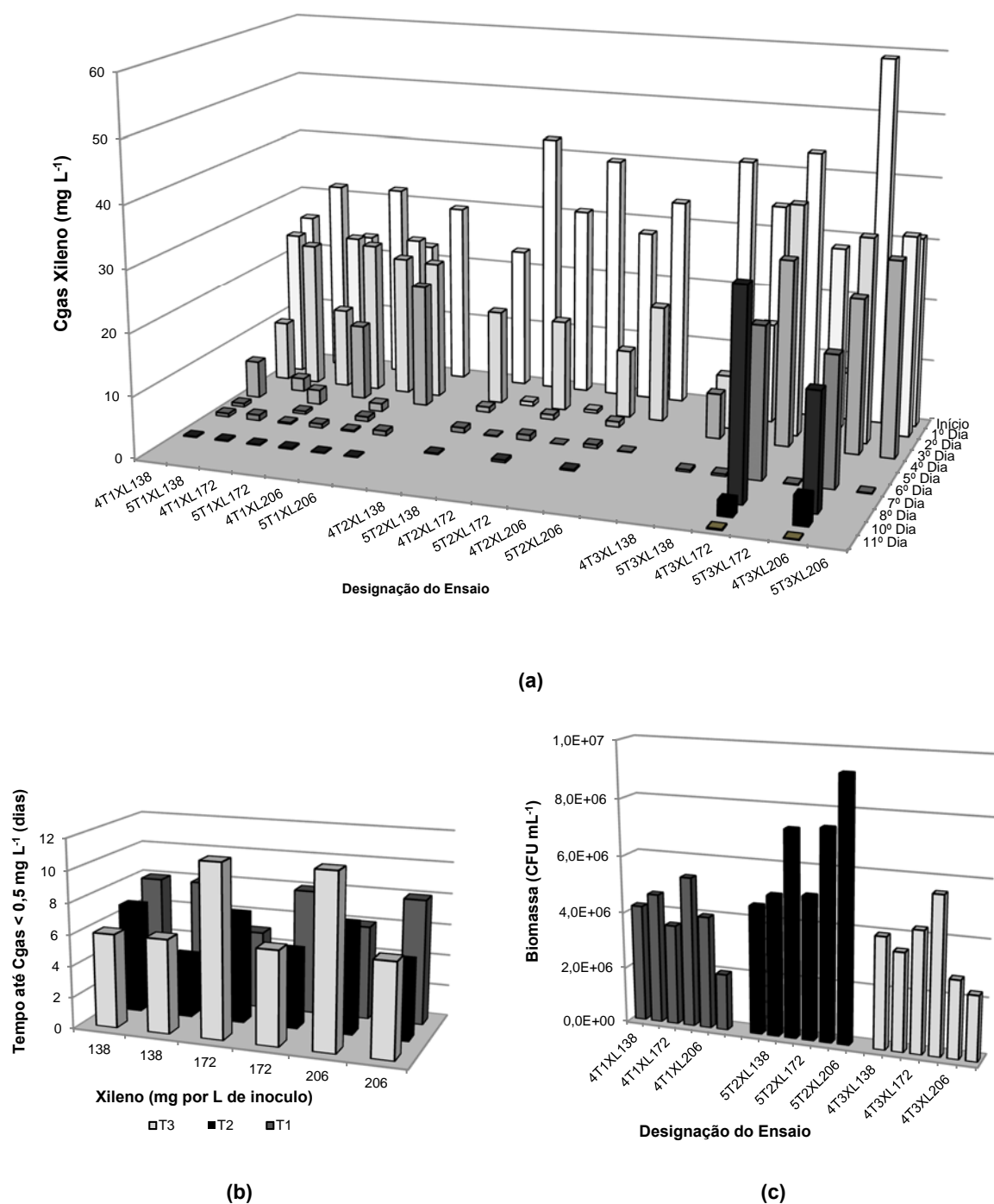


Figura 3.16 – Bio-degradação do xileno para os níveis de contaminação seleccionados (138, 172 e 206 mg L⁻¹): (a) Evolução da concentração de xileno na fase gasosa. (b) Tempo necessário para atingir a concentração residual. (c) Quantificação da biomassa no final dos ensaios.

Todos os ensaios foram realizados em duplicado e os resultados apresentados permitiram certificar a reprodutibilidade dos ensaios e verificar que:

- ✓ em todos os ensaios foi atingida a concentração residual na fase gasosa de $0,5 \text{ mg L}^{-1}$;
- ✓ nas primeiras transferências, o tempo necessário para atingir a concentração residual na fase gasosa de $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ foi de 8 dias em 66 % dos casos, 6 dias em 17 % dos casos e 5 dias em 17 % dos casos;
- ✓ nas segundas transferências, o tempo necessário para atingir a concentração residual na fase gasosa de $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ foi de 7 dias em 50 % dos casos, 5 dias em 33 % dos casos e 4 dias em 17 % dos casos;
- ✓ nas terceiras transferências, o tempo necessário para atingir a concentração residual na fase gasosa de $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ foi de 6 dias em 67 % dos casos e de 11 dias em 33 % dos casos;
- ✓ considerando a mesma transferência (1^a, 2^a ou 3^a), verificou-se que o tempo máximo necessário para atingir a concentração residual não aumentou com o nível de contaminação testado, no caso das primeiras e segundas transferências. No caso das terceiras transferências, o tempo máximo necessário para atingir a concentração residual foi menor para o menor nível de contaminação testado (138 mg L^{-1});
- ✓ a quantificação da biomassa no final dos ensaios permitiu verificar que o maior crescimento de microrganismos ocorreu, em todos os níveis de contaminação, na segunda transferência.

Com base nestes resultados, considerou-se que o inóculo a utilizar nos ensaios de bio-remediação de solos contaminados com xileno deveria ser proveniente de segundas transferências, com nível de contaminação de 206 mg L^{-1} .

3.4.1.2. BENZENO

Na Figura 3.17 estão sintetizados os resultados obtidos na primeira fase dos estudos de cinética da bio-degradação do benzeno. Está representada a evolução no tempo das concentrações de benzeno na fase gasosa para todos os níveis de contaminação testados nas três transferências realizadas (a), o tempo necessário para, em cada caso, se atingir a concentração residual na fase gasosa de $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ (b) e a biomassa quantificada no final de cada ensaio (c).

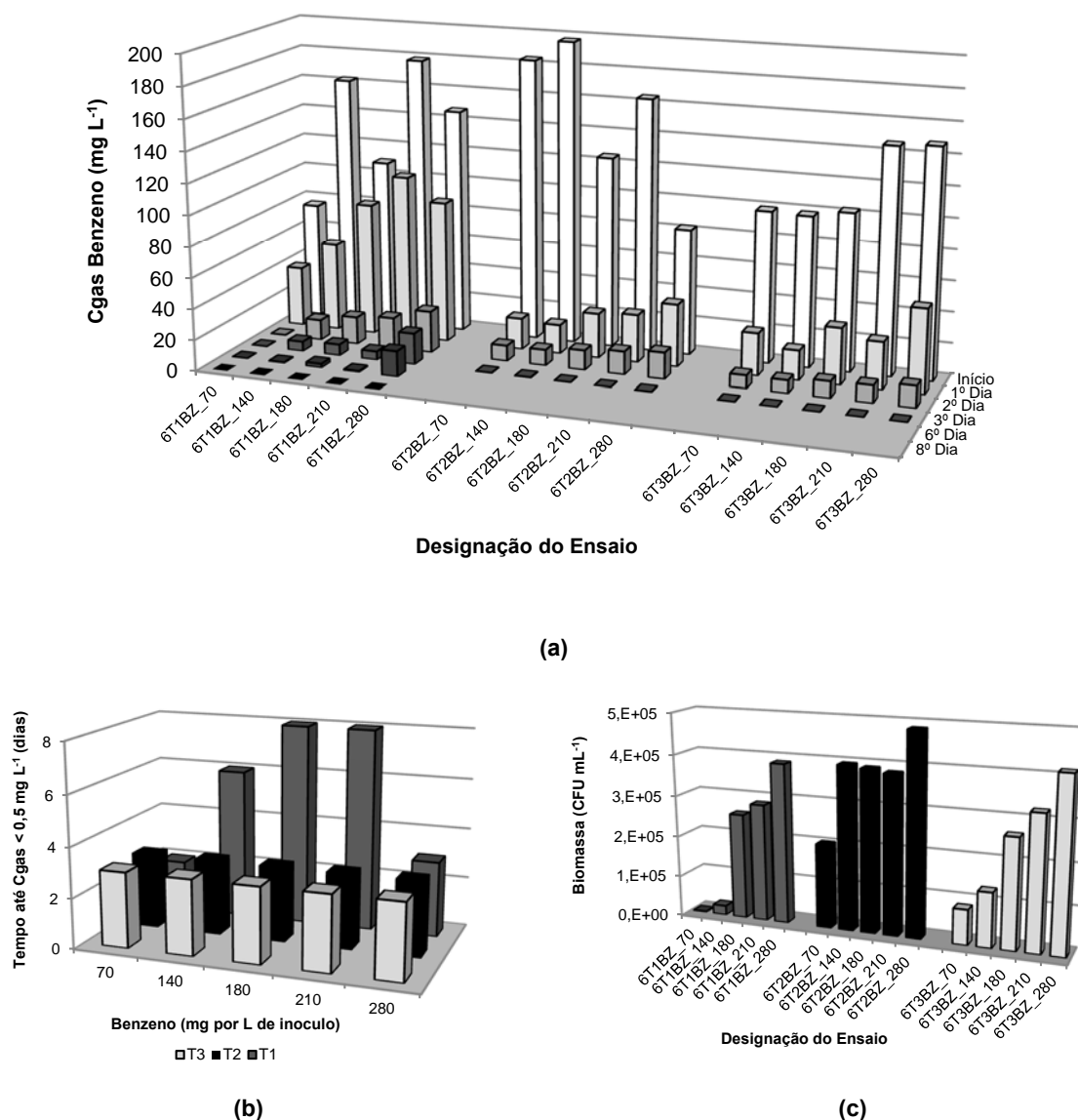


Figura 3.17 – Bio-degradação do benzeno em meio líquido: (a) Evolução da concentração de benzeno na fase gasosa. (b) Tempo necessário para atingir a concentração residual. (c) Quantificação da biomassa no final dos ensaios.

Os resultados apresentados permitiram verificar que:

- ✓ o consórcio microbiano degradou o benzeno em todos os níveis de contaminação testados, tendo sido sempre atingida a concentração residual na fase gasosa de 0,5 mg por litro;
- ✓ a primeira transferência foi, na maioria dos casos, mais lenta do que a segunda e a terceira;
- ✓ o tempo necessário para a degradação do benzeno (3 dias) foi igual nas segundas e terceiras transferências, em todos os níveis de contaminação estudados;

- ✓ para o mesmo nível de contaminação, a biomassa desenvolvida é sempre superior na segunda transferência e inferior na primeira;
- ✓ o maior crescimento de microrganismos verificou-se, em todas as transferências, para contaminação de 280 mg L⁻¹.

Com base nestes resultados optou-se por verificar a reprodutibilidade dos resultados na gama de concentrações que se tinha revelado mais favorável (180, 210 e 280 mg L⁻¹). Os resultados desta segunda fase de ensaios foram idênticos aos anteriores, embora a segunda transferência tenha sido mais rápida do que a terceira. Na Figura 3.18 sintetizam-se os resultados obtidos.

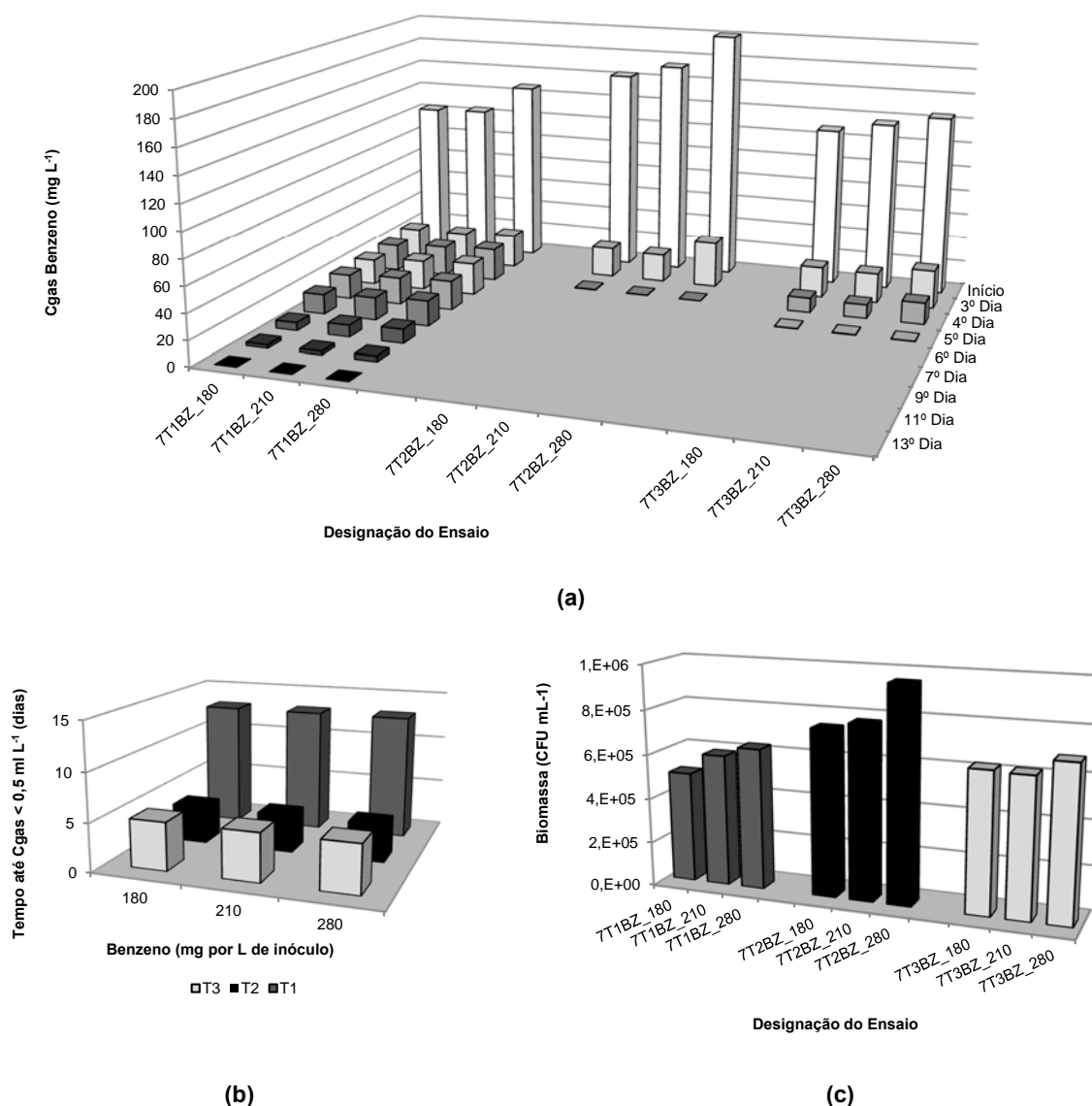


Figura 3.18 – Bio-degradação do benzeno em meio líquido para os níveis de contaminação seleccionados (180, 210 e 280 mg L⁻¹): (a) Evolução da concentração de benzeno na fase gasosa. (b) Tempo necessário para atingir a concentração residual. (c) Quantificação da biomassa no final dos ensaios.

Com base neste estudo considerou-se que havia reprodutibilidade nos ensaios e o inóculo a utilizar nos ensaios de bio-degradação de solos contaminados com benzeno deveria ser proveniente de segundas transferências com nível de contaminação de 280 mg L^{-1} .

3.4.2. ESTUDOS DE BIO-REMEDIAÇÃO EM SOLOS

A realização de ensaios exploratórios de bio-remediação em solos teve como objectivos principais verificar o comportamento de consórcio microbiano desenvolvido em meio líquido quando aplicado em solos não saturados, avaliar os níveis máximos de contaminação admitidos e desenvolver uma metodologia e condições de operação adequadas para os ensaios finais de bio-remediação e de bio-ventilação. Neste subcapítulo apresentam-se os resultados obtidos nesses ensaios. Os resultados estão organizados por escala (frasco e coluna) e contaminante (xileno e benzeno). Os dados experimentais obtidos e utilizados na análise seguidamente apresentada encontram-se no Anexo V.

3.4.2.1. ENSAIOS DE BIO-REMEDIAÇÃO EM FRASCO DE SOLOS CONTAMINADOS COM XILENO

A evolução da concentração de xileno na fase gasosa nos ensaios de bio-remediação realizados, em frasco, em solo residual granítico a 20 e a 26 °C contaminado com 70, 86 e 103 mg kg^{-1} estão sintetizados na Figura 3.19 (a) e (b), respectivamente. Na Figura 3.20 apresentam-se os resultados obtidos na quantificação da biomassa no final destes ensaios. Os ensaios não inoculados (brancos), referenciados por FB na designação do ensaio, foram realizados com solos não esterilizados para avaliar o potencial remediador dos microrganismos autóctones.

Os resultados obtidos revelaram que:

- ✓ a concentração residual de $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ foi atingida em todos os ensaios inoculados, pelo que, na gama de contaminação estudada, o consórcio microbiano desenvolvido tinha capacidade para biorremediar solos residuais graníticos contaminados com xileno, em ambas as temperaturas estudadas;
- ✓ os microrganismos autóctones do solo residual granítico (ensaios FBSR) não tinham capacidade para biodegradar xileno;
- ✓ quanto maior era a contaminação mais longa foi a fase inicial de adaptação dos microrganismos e maior o tempo de bio-remediação, estes factos foram mais evidentes para a temperatura de ensaio mais baixa (20°C);
- ✓ a bio-remediação iniciou-se mais cedo e foi mais rápida nos ensaios realizados a 26°C;
- ✓ o crescimento microbiano aumentou com a disponibilidade de xileno e com a temperatura de ensaio.

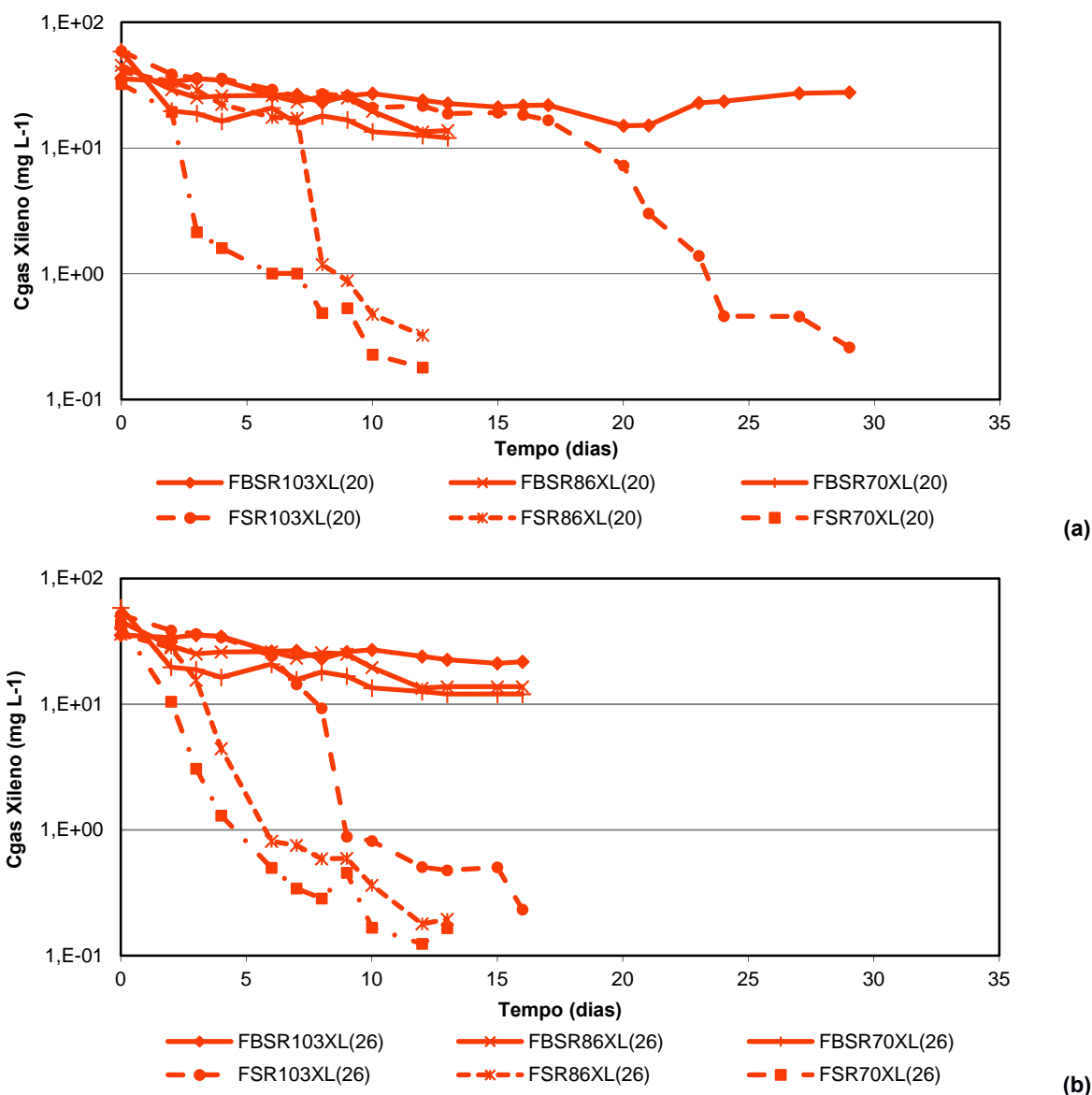


Figura 3.19 – Evolução da concentração de xileno na fase gasosa nos ensaios de bio-remediação realizados em frasco, em solo residual granítico a 20°C (a) e a 26°C (b) com níveis de contaminação de 70, 86 e 103 mg kg⁻¹. Linhas contínuas representam ensaios de branco.

Perante estes resultados optou-se por estudar a evolução da concentração de xileno na fase gasosa nos ensaios de bio-remediação realizados em frasco, à temperatura de 25°C e com contaminação de 103 mg kg⁻¹, nos três solos em estudo (calcário, granito e xisto). Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 3.21.

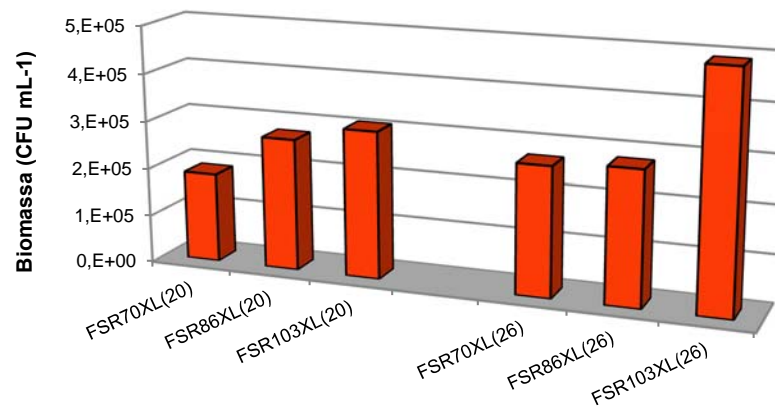


Figura 3.20 - Quantificação da biomassa no final dos ensaios de bio-remediação, em frasco, de solo residual granítico contaminado com xileno (70, 86 e 103 mg kg⁻¹), com temperaturas de ensaio de 20 e 26 °C.

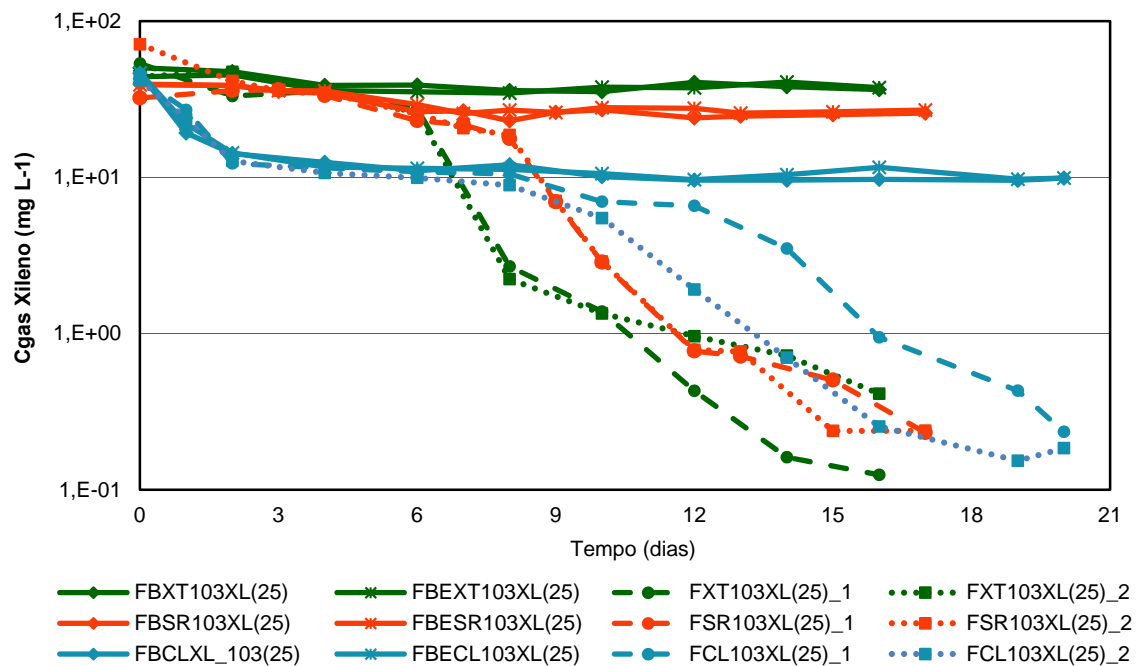


Figura 3.21 - Evolução da concentração de xileno na fase gasosa nos ensaios de bio-remediação realizados, em frasco a 25°C, com contaminação de 103 mg kg⁻¹, em solo xistoso (verde), solo residual granítico (laranja) e solo calcário (azul). Linhas contínuas representam ensaios de branco e linhas contínuas com asterisco representam ensaios brancos estéreis.

A análise dos dados apresentados permitiu verificar que:

- ✓ os microrganismos autóctones dos três solos em estudo não apresentavam capacidade para biodegradar o xileno, como se pode observar através das curvas correspondentes aos ensaios não inoculados realizados em solos não esterilizados (FBXT103XL(25), FBSR103XL(25), FBCL103XL(25));
- ✓ a concentração residual de $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ foi atingida em todos os ensaios inoculados, pelo que a bio-remediação ocorreu com sucesso nos três tipos de solos testados;
- ✓ a adaptação inicial dos microrganismos e o tempo de bio-remediação foi menor no solo xistoso e maior no solo calcário, o que poderá estar relacionado não só com a quantidade de microrganismos presentes mas também com as diferentes capacidades de adsorção do xileno nestes solos.

A quantificação da biomassa realizada no final dos ensaios (Figura 3.22) revelou que a população era maior no solo xistoso, sendo semelhante no granito e no calcário. Nos ensaios não inoculados verificou-se que no solo granítico a biomassa era idêntica no final dos ensaios não inoculados (branco e branco estéril), enquanto no calcário e no xisto houve crescimento microbiano superior nos ensaios realizados com solos não esterilizados; isto poderá indicar que, embora sem capacidade de biodegradar xileno, os microrganismos autóctones destes dois solos têm capacidade para se desenvolver em ambientes contaminados com xileno.

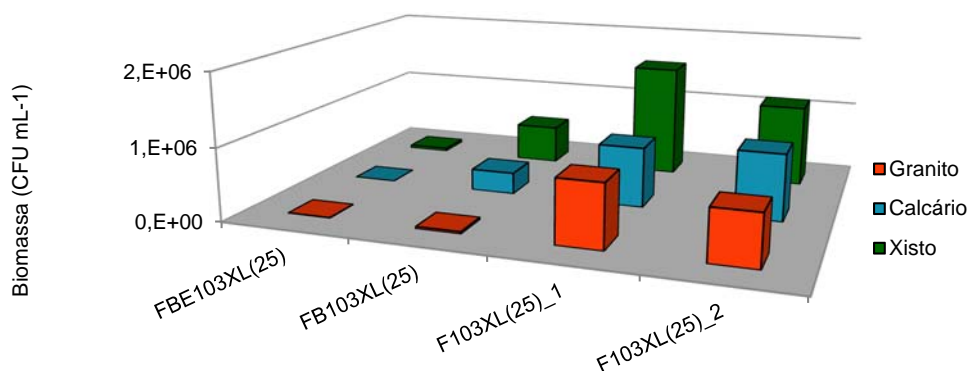


Figura 3.22 - Quantificação da biomassa no final dos ensaios de bio-remediação realizados, em frasco a 25°C, com contaminação de 103 mg kg^{-1} , em solo xistoso, solo residual granítico e solo calcário.

A eficiência teórica da remediação no final dos ensaios inoculados, calculada de acordo com a Equação 2.15, é seguidamente apresentada na Figura 3.23. A análise dos resultados aponta para valores muito elevados, compreendidos entre 97,4 e 99,7 %, sendo os valores obtidos no calcário ligeiramente inferiores aos do granito e do xisto.

Este estudo revelou que o consórcio microbiano desenvolvido tem, para os níveis de contaminação e condições utilizadas, capacidade para bio-remediar estes três solos contaminados com xileno.

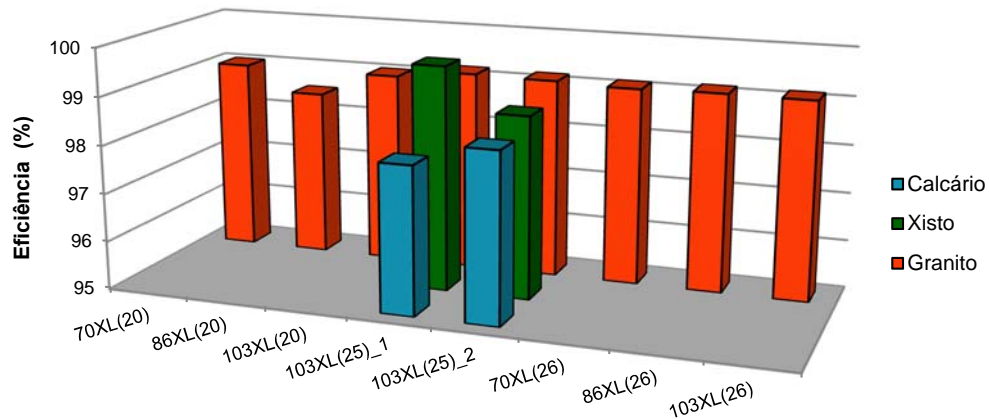


Figura 3.23 - Eficiência teórica da bio-remediação dos solos contaminados com xileno, determinada no final dos ensaios inoculados, em solo xistoso, solo residual granítico e solo calcário.

3.4.2.2. ENSAIOS DE BIO-REMEDIAÇÃO EM FRASCO DE SOLOS CONTAMINADOS COM BENZENO

A evolução da concentração de benzeno na fase gasosa nos ensaios de bio-remediação realizados, em frasco, em solo residual granítico a 25°C, com níveis de contaminação de 88, 105 e 140 mg kg⁻¹ estão sintetizados na Figura 3.24. Os resultados obtidos revelaram que:

- ✓ a concentração residual de 0,5 mg L⁻¹ foi atingida em todos os ensaios inoculados, pelo que o consórcio microbiano desenvolvido tem capacidade para biorremediar solos residuais graníticos contaminados com benzeno para a gama de contaminação estudada;
- ✓ os microrganismos autóctones do solo residual granítico não tinham capacidade para biodegradar benzeno;
- ✓ a adaptação inicial dos microrganismos e o tempo de bio-remediação foi idêntico nos três níveis de contaminação estudados.

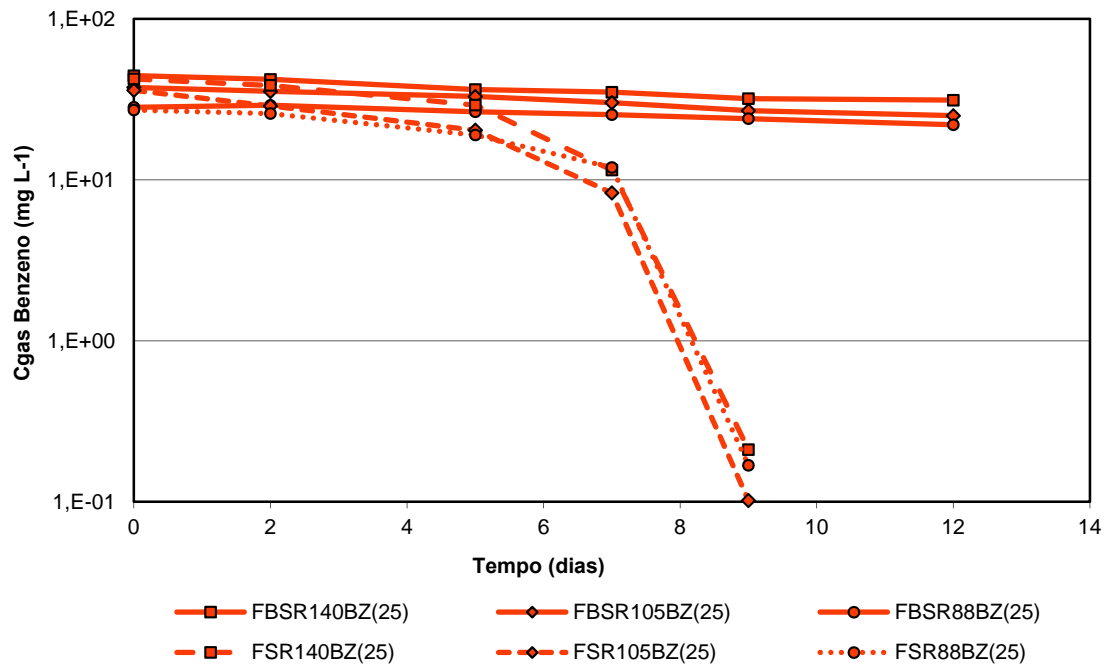
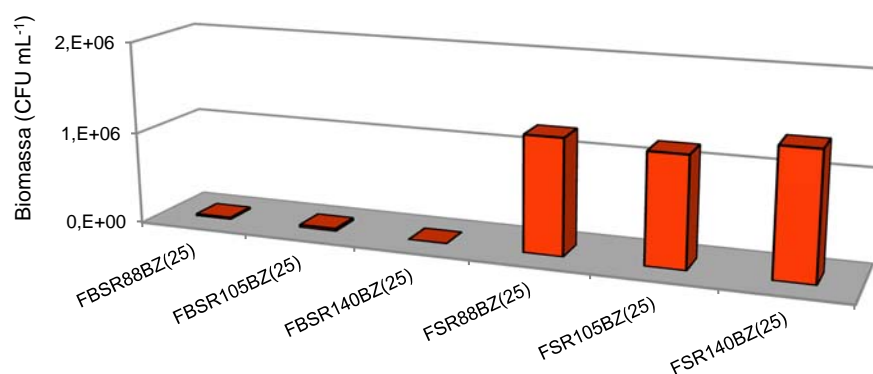
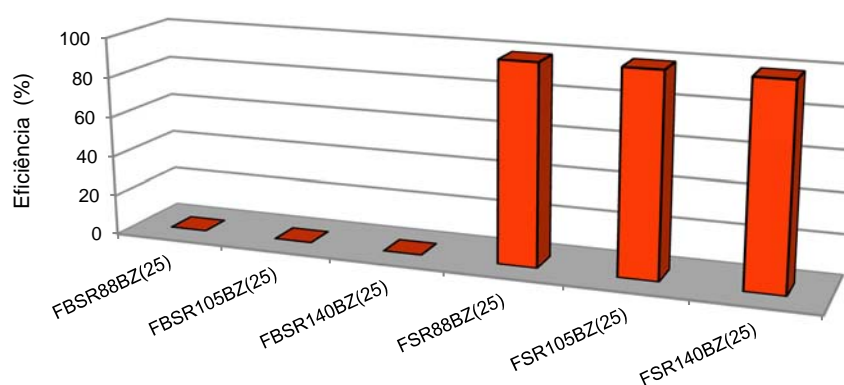


Figura 3.24 – Evolução da concentração de benzeno na fase gasosa nos ensaios de bio-remediação em solo residual granítico realizados em frasco a 25°C, com níveis de contaminação de 88, 105 e 140 mg kg⁻¹.

A quantificação da biomassa no final destes ensaios, apresentada na Figura 3.25 (a), apontou para crescimentos semelhantes nos três níveis de contaminação dos ensaios inoculados e crescimento muito inferior nos ensaios não inoculados. A eficiência teórica da remediação calculada no final dos ensaios inoculados é seguidamente apresentada na Figura 3.25 (b); a análise dos resultados apontou para valores elevados, compreendidos entre 98,9 e 99,4 %.



(a)



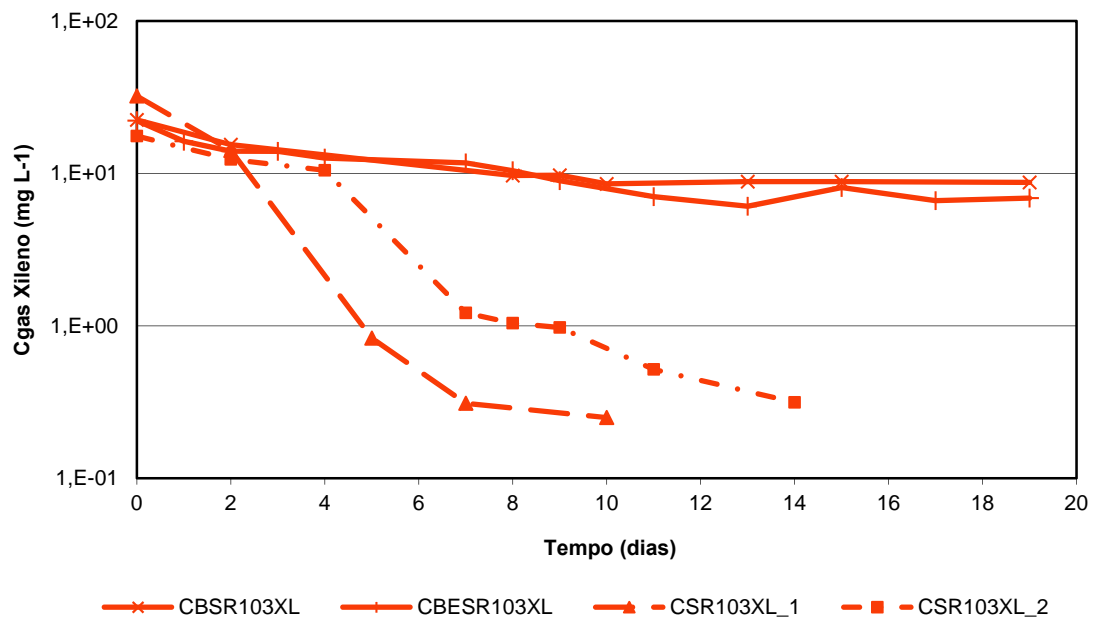
Designação do Ensaio

(b)

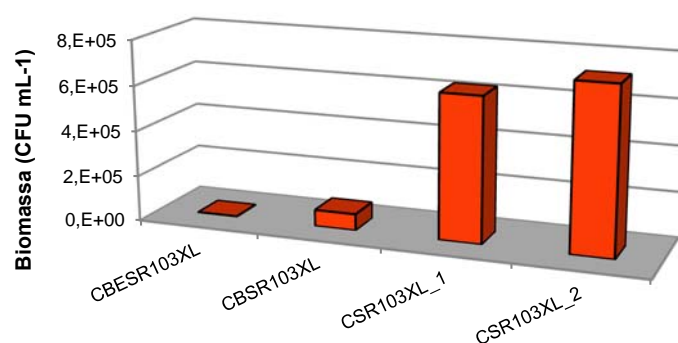
Figura 3.25 – Ensaio de bio-remediação realizados, em frasco a 25°C, com níveis de contaminação de 88, 105 e 140 mg kg⁻¹, em solo residual granítico contaminado com benzeno: (a) Quantificação da biomassa no final dos ensaios. (b) Eficiência teórica determinada no final dos ensaios inoculados.

3.4.2.3. ENSAIOS DE BIO-REMEDIÇÃO EM COLUNA DE SOLOS CONTAMINADOS COM XILENO

Os ensaios realizados em frasco comprovaram a adequação da metodologia desenvolvida na remediação de solos, pelo que se prosseguiu com um aumento de escala laboratorial, passando os ensaios a ser realizados em colunas de aço inoxidável com 3,9 L e provetes de solo húmido com 2000 g. A evolução da concentração de xileno na fase gasosa e a quantificação da biomassa no final dos ensaios de bio-remediação realizados em coluna, a 25°C, em solo residual granítico com contaminação de 103 mg kg⁻¹ e 155 mg kg⁻¹, encontram-se representadas nas Figura 3.26 e 3.27, respectivamente.

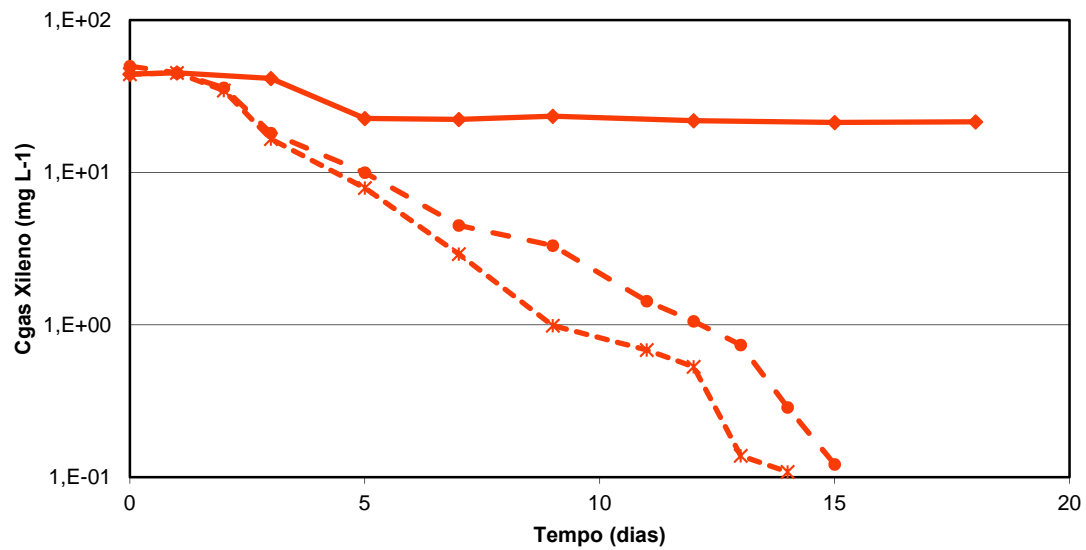


(a)

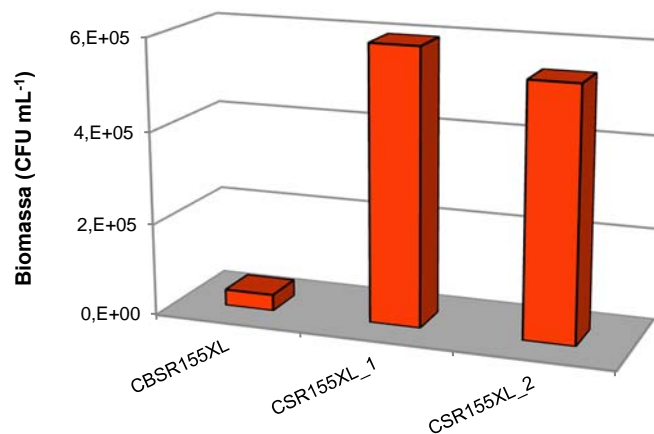


(b)

Figura 3.26 – Ensaio de bio-remediação realizados em coluna a 25°C, em solo residual granítico contaminado com xileno (103 mg kg⁻¹): (a) Evolução da concentração de xileno na fase gasosa; (b) Quantificação da biomassa no final dos ensaios.



(a)



(b)

Figura 3.27 – Ensaio de bio-remediação realizados em coluna a 25°C, em solo residual granítico contaminado com xileno (155 mg kg⁻¹): (a) Evolução da concentração de xileno na fase gasosa; (b) Quantificação da biomassa no final dos ensaios.

Os resultados obtidos foram semelhantes aos realizados em frasco:

- ✓ os microrganismos autóctones do solo residual granítico não apresentaram capacidade para biodegradar o xileno, como se pode observar através dos resultados obtidos nos ensaios não inoculados realizados em solos não esterilizados (CBSR103XL e CBSR155XL);

- ✓ a concentração residual ($0,5 \text{ mg L}^{-1}$) foi atingida, nos dois níveis de contaminação, em todos os ensaios inoculados, pelo que o consórcio microbiano desenvolvido teve capacidade para biorremediar este solo;
- ✓ para o mesmo nível de contaminação, o tempo necessário para a bio-remediação foi inferior ao obtido nos ensaios realizados em frasco à mesma temperatura, o que evidenciou boa adaptação do consórcio ao aumento de escala (1 para 10);
- ✓ o tempo de bio-remediação foi ligeiramente inferior no nível de contaminação mais baixo (103 mg kg^{-1}) mas o período inicial de adaptação dos microrganismos foi, contrariamente ao esperado, ligeiramente superior.

Seguidamente, foi estudada a evolução da concentração de xileno na fase gasosa nos ensaios de bio-remediação realizados em coluna, a 25°C , em solo residual granítico, solo xistoso e solo calcário, usando uma contaminação de 155 mg kg^{-1} . Os resultados apresentados na Figura 3.28 foram semelhantes aos obtidos em frasco, em que os microrganismos autóctones não apresentaram capacidade para biodegradar o xileno (CBCL155XL, CBSR155XL e CBXT155XL).

O tempo de remediação nestes ensaios em coluna foi, em todos os solos, inferior ao obtido nos ensaios realizados em frasco à mesma temperatura. Considerando que o nível de contaminação foi superior (passou de 103 para 155 mg kg^{-1}), poderá considerar-se que o aumento de escala foi favorável para o processo. O tempo de remediação no xisto foi ligeiramente menor que no granito e no calcário.

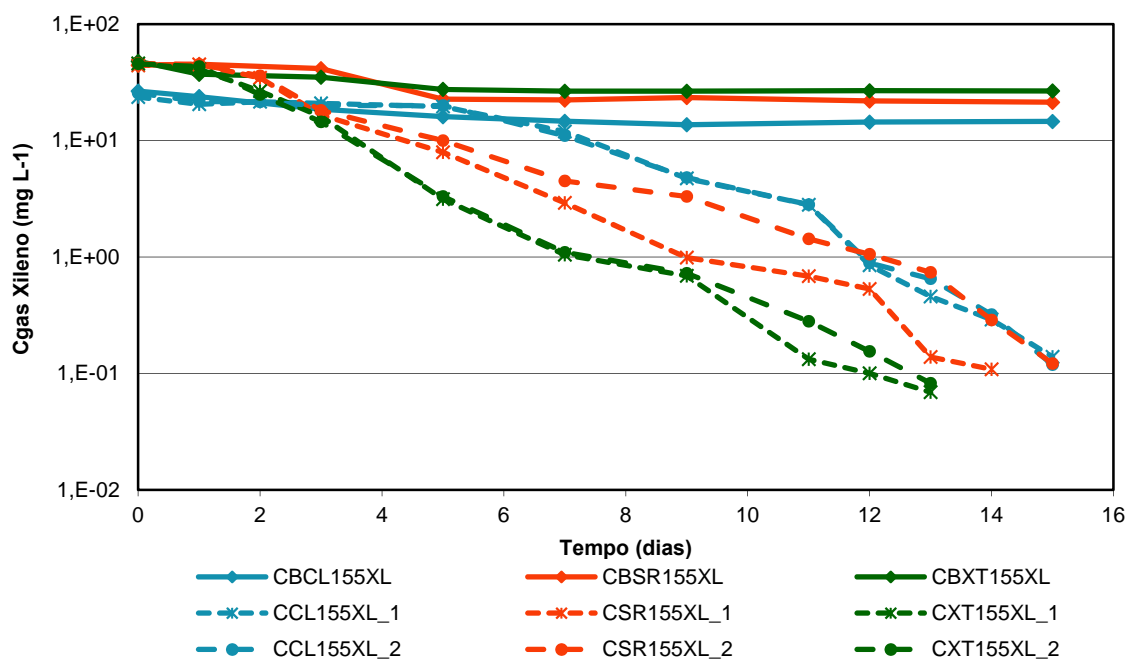


Figura 3.28 – Evolução da concentração de xileno na fase gasosa nos ensaios de bio-remediação realizados em coluna a 25°C , em solo xistoso (verde), solo residual granítico (laranja) e solo calcário (azul), com nível de contaminação de 155 mg kg^{-1} .

Os valores da biomassa no final dos ensaios de bio-remediação em coluna, a 25 °C, com nível de contaminação de 155 mg kg⁻¹, nos três tipos de solo são apresentados na Figura 3.29. Os resultados apresentados foram semelhantes aos obtidos em frasco, embora se tenha verificado que a população desenvolvida no granito foi inferior à do calcário. A biomassa quantificada nos ensaios em solo residual granítico aqui descritos foi da mesma ordem de grandeza da determinada em todos os ensaios exploratórios realizados neste tipo de solo independentemente do nível de contaminação, o que poderá apontar para a existência de algum factor inibidor do crescimento de microrganismos neste tipo de solo. No calcário e no xisto a biomassa no final dos ensaios aumentou com o aumento do nível de contaminação (Figuras 3.22 e 3.29).

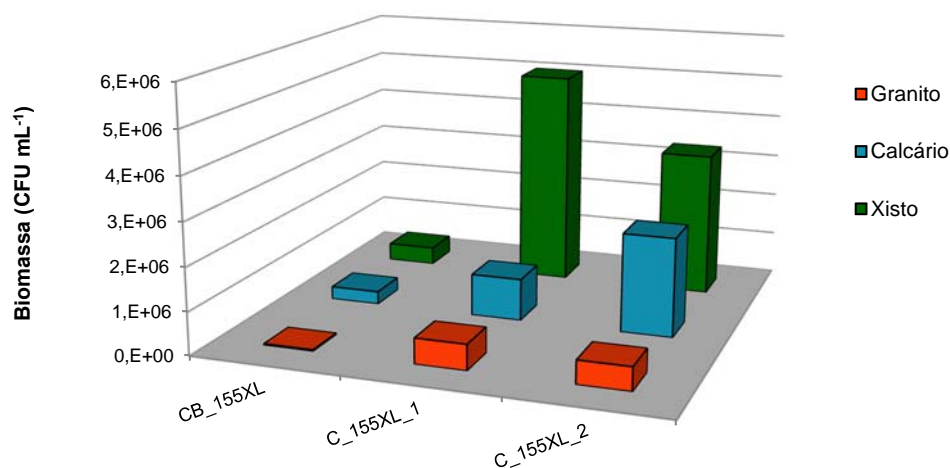


Figura 3.29 – Quantificação da biomassa no final dos ensaios de bio-remediação realizados em coluna a 25 °C, em solo xistoso, solo residual granítico e solo calcário, com nível de contaminação de 155 mg kg⁻¹.

Na Figura 3.30 (a e b) apresentam-se as eficiências teóricas da remediação calculadas no final dos ensaios inoculados. Os valores obtidos estão compreendidos entre 84,2 e 99,9 %. Os valores mais elevados verificaram-se no solo xistoso e no solo calcário, onde a eficiência é sempre superior a 99 %. Os valores mais baixos ocorreram na bio-remediação de solo granítico para o nível de contaminação mais elevado (155 mg kg⁻¹).

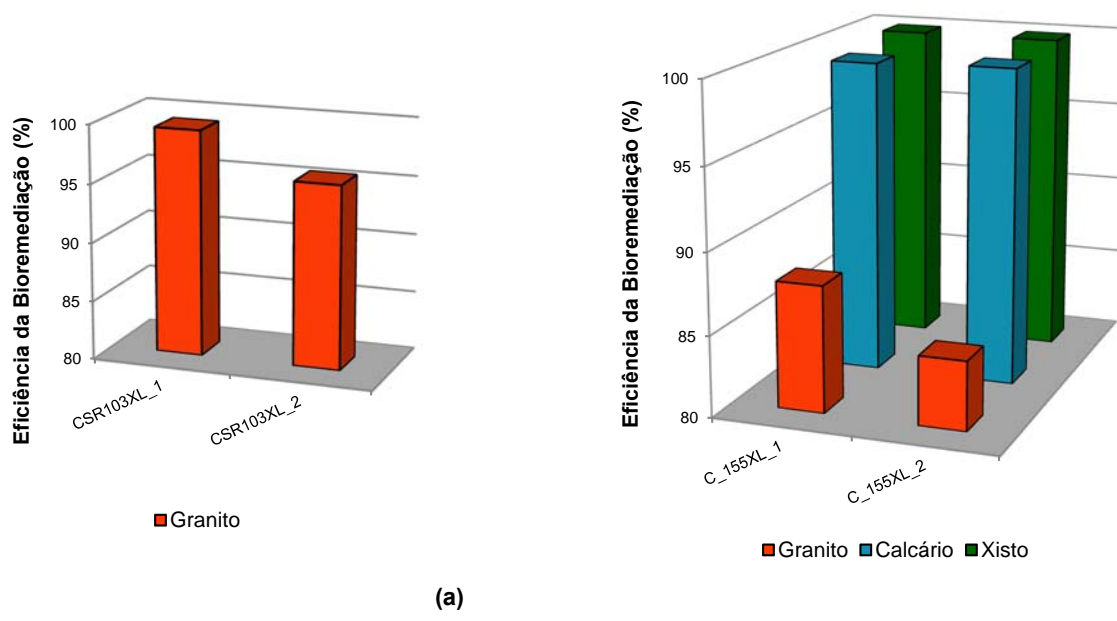


Figura 3.30 – Eficiência teórica da bio-remediação dos ensaios realizados em coluna, a 25 °C, em (a) solo residual granítico com nível de contaminação de 103 mg kg⁻¹; (b) em solo xistoso, solo residual granítico e solo calcário com nível de contaminação de 155 mg kg⁻¹.

Os resultados obtidos nestes ensaios em coluna vieram corroborar os anteriormente obtidos em frasco e revelaram excelente capacidade de adaptação do consórcio ao aumento de escala do ensaio, o que perspectivou um bom indicador para a passagem a escalas piloto.

Os resultados obtidos no conjunto dos ensaios exploratórios realizados permitiram verificar elevada adaptabilidade do consórcio microbiano utilizado e estabelecer a metodologia a adotar nos ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação.

3.4.2.4. ENSAIOS DE BIO-REMEDIÇÃO EM COLUNA DE SOLOS CONTAMINADOS COM BENZENO

A evolução da concentração de benzeno na fase gasosa nos ensaios de bio-remediação realizados em coluna, a 25°C, em solo residual granítico com nível de contaminação de 140 mg kg⁻¹ é apresentada na Figura 3.31. Comparando estes resultados com os obtidos nos ensaios de bio-remediação em coluna de solos contaminados com xileno, verificou-se que a fase inicial de adaptação dos microrganismos foi mais longa no caso do benzeno e o tempo de remediação foi superior. À semelhança do que aconteceu com os ensaios realizados com xileno, os microrganismos autóctones não apresentaram capacidade para biodegradar o benzeno.

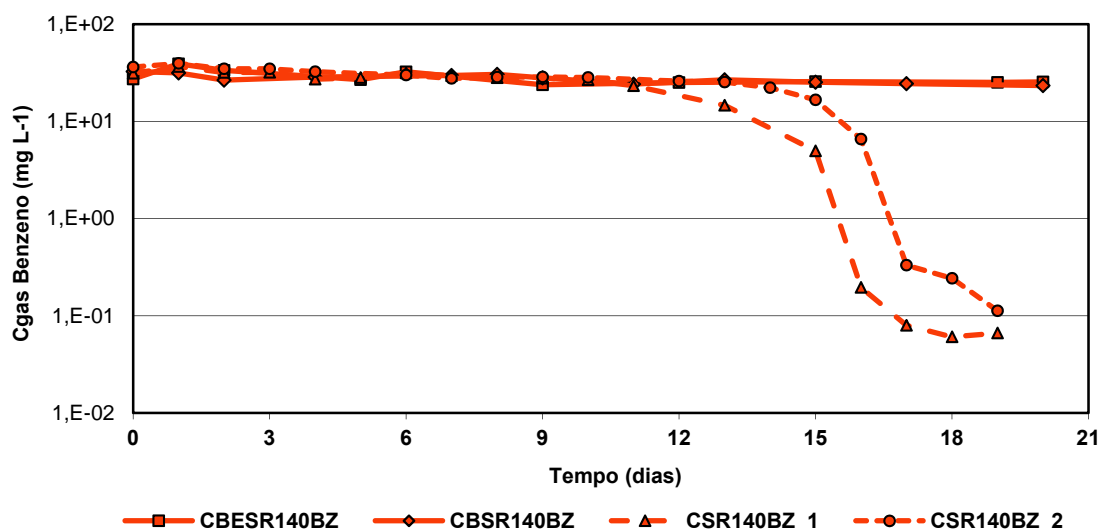


Figura 3.31 – Evolução da concentração de benzeno na fase gasosa nos ensaios de bio-remediação realizados, em coluna a 25°C, em solo residual granítico, com nível de contaminação de 140 mg kg⁻¹. Linhas contínuas representam ensaios de branco.

A eficiência teórica da remediação calculada, de acordo com a Equação 2.15, no final dos ensaios inoculados, apresentada na Figura 3.32 (a), apontou para valores muito elevados, 99,6 e 99,8 %.

Os resultados obtidos na quantificação da biomassa no final dos ensaios de bio-remediação são apresentados na Figura 3.32 (b) e apontaram para crescimentos idênticos nos duplicados dos ensaios inoculados e crescimento muito inferior nos ensaios não inoculados; verifica-se, no entanto, crescimento microbiano no ensaio não inoculado em que foi utilizado solo não esterilizado.

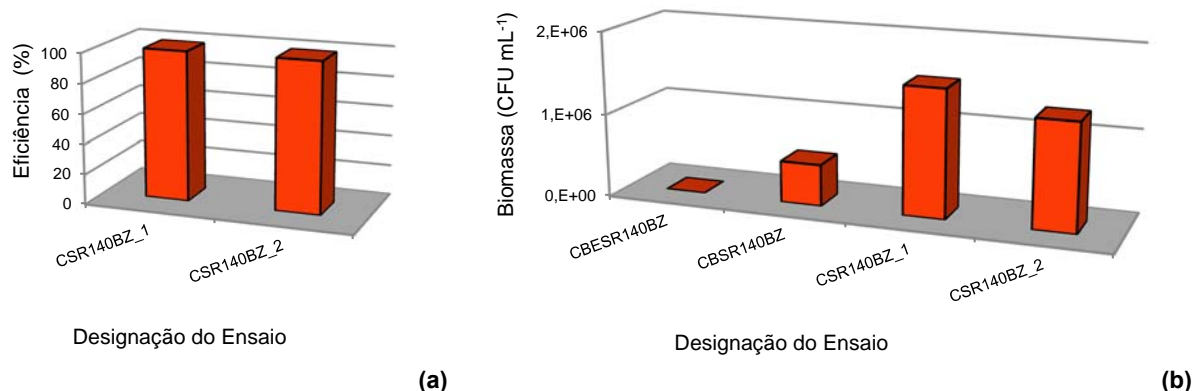


Figura 3.32 – Ensaios de bio-remediação realizados em solo residual granítico contaminado com benzeno (140 mg kg⁻¹), em coluna a 25°C (a) Eficiência teórica no final dos ensaios; (b) Quantificação da biomassa no final dos ensaios.

Com base nos resultados obtidos nestes estudos exploratórios, constatou-se que o consórcio microbiano reagiu menos favoravelmente ao aumento de escala na presença de benzeno do que na presença de xileno, havendo no caso do benzeno um considerável aumento da fase inicial de latência. Verifica-se, contudo, que ultrapassado este período de adaptação, os microrganismos conseguiram biodegradar o benzeno atingindo eficiências de remediação elevadas e idênticas ao xileno no final dos ensaios.

3.5. ENSAIOS DE BIO-REMEDIÇÃO E DE BIO-VENTILAÇÃO

3.5.1. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS

Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação em coluna e a 25 °C. Os dados experimentais obtidos e utilizados na análise seguidamente apresentada encontram-se no Anexo VI. Os resultados estão organizados por tipo de solo (CL, SR e XT) e dentro de cada tipo de solo por contaminante (B, T, E, X e BTEoX). Para cada situação foram realizados ensaios de bio-remediação inoculados (B), ensaios de bio-remediação não inoculados (Bb), ensaios de bio-ventilação inoculados (BV) e ensaios de bio-ventilação não inoculados (BVb); nos ensaios não inoculados foram utilizados solos previamente esterilizados. Em cada caso é apresentada a evolução ao longo do tempo da concentração de contaminante na fase gasosa, a biomassa no final do ensaio, a eficiência teórica de remediação no final do ensaio, a ordem da reacção e a constante cinética. No caso dos ensaios de bio-ventilação é ainda apresentada a evolução ao longo do tempo das concentrações de oxigénio e de dióxido de carbono na fase gasosa.

3.5.1.1. ENSAIOS REALIZADOS EM CALCÁRIO

Os resultados obtidos nos ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação realizados em calcário encontram-se sintetizados nas Figuras 3.33 a 3.38.

A análise dos resultados obtidos nos ensaios em calcário contaminado com 200 mg kg⁻¹ de benzeno (BVbCL_B, BbCL_B, BVCL_B e BCL_B), Figuras 3.33 e 3.38, permite verificar que:

- ✓ no ensaio de bio-remediação não inoculado (BbCL_B), após estabelecimento do equilíbrio no sistema, as concentrações na fase gasosa mantiveram-se aproximadamente constantes. Este resultado está de acordo com o expectável uma vez que o solo utilizado foi previamente esterilizado pelo que não deveria ocorrer biodegradação;
- ✓ no ensaio de bio-ventilação não inoculado (BVbCL_B) a concentração vai diminuindo ligeiramente ao longo do tempo resultante da ventilação diária e consequente perda de contaminante por advecção. Verificou-se que entre o sexto e o nono dia, houve uma

diminuição da concentração de benzeno na fase gasosa, acompanhado por um aumento no consumo de oxigénio e produção de dióxido de carbono (Figura 3.33 (a) e (b)); neste período parece ter ocorrido alguma actividade biológica que poderá ser explicada pela dificuldade em garantir a completa esterilização do solo ou pela entrada de microrganismos durante a circulação de ar. Os valores elevados da quantificação da biomassa no final do ensaio de branco (Figura 3.38 (a)) confirmaram a possibilidade de ter ocorrido bio-degradação;

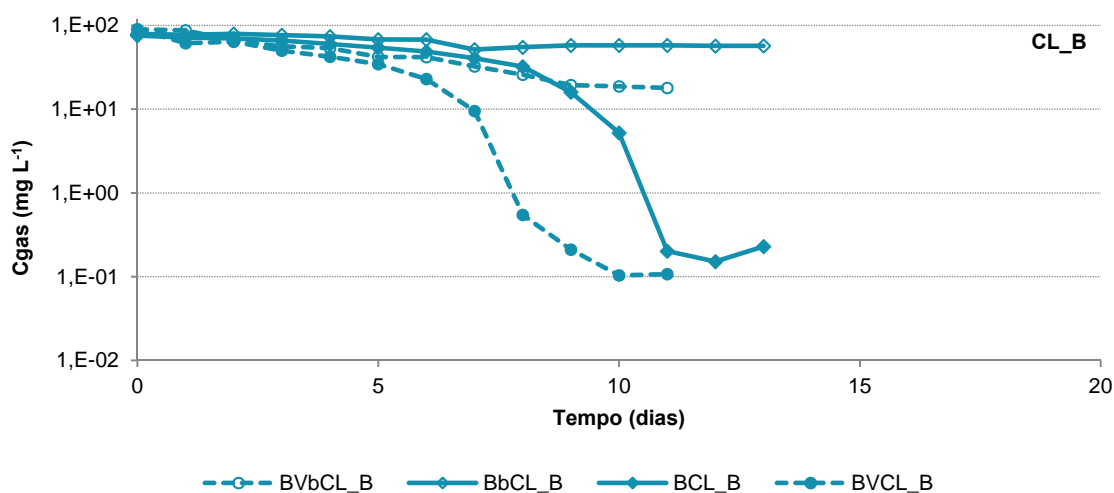
- ✓ para o nível de contaminação estudado, foi possível remediar o solo quer por bio-remediação (BCL_B) quer por bio-ventilação (BVCL_B); a principal diferença residuiu no tempo necessário à remediação. Como se pode verificar nas Figuras 3.33 (a) e 3.38, ao fim de sete dias o ensaio de bio-ventilação já apresentava uma eficiência de remediação superior a 80 %, enquanto no ensaio de bio-remediação era da ordem dos 40 %. O tempo necessário para atingir o nível residual de contaminante ($< 0,5 \text{ mg L}^{-1}$ na fase gasosa) foi de onze dias no ensaio de bio-ventilação e de treze dias no ensaio de bio-remediação. As eficiências teóricas calculadas no final dos ensaios apontaram para valores elevados, 99,6 no ensaio de bio-ventilação e 99,3 no ensaio de bio-remediação (Figura 3.38 (b));
- ✓ comparando as evoluções das concentrações de contaminante, de oxigénio e de dióxido de carbono, verificou-se que a respirometria respondeu sem atraso significativo e retratou adequadamente a bio-degradação (Figura 3.33 (a) e (b)).

A análise dos resultados obtidos nos ensaios em calcário contaminado com 200 mg kg^{-1} de tolueno (BVbCL_T, BbCL_T, BVCL_T e BCL_T), Figuras 3.34 e 3.38, permitiu verificar que:

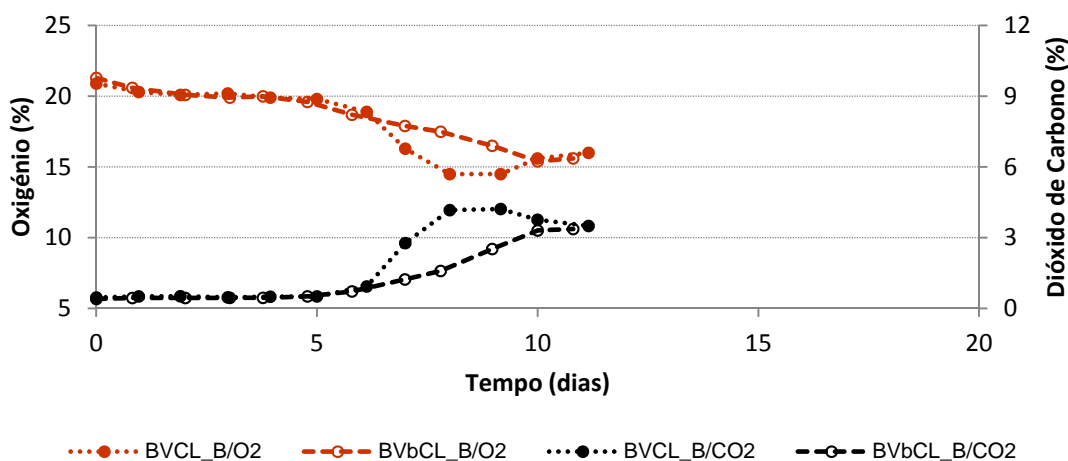
- ✓ no ensaio de bio-remediação não inoculado (BbCL_T), após estabelecimento do equilíbrio no sistema, as concentrações na fase gasosa mantiveram-se aproximadamente constantes, como expectável, uma vez que o solo utilizado foi previamente esterilizado;
- ✓ no ensaio de bio-ventilação não inoculado (BVbCL_T), a concentração de tolueno foi diminuindo ligeiramente ao longo do tempo tal como no ensaio com benzeno. Embora a evolução das concentrações de contaminante na fase gasosa (Figura 3.34 (a)) não evidenciem actividade biológica, as concentrações de oxigénio e de dióxido de carbono sofrem alterações a partir de quinto dia até ao final do ensaio; mais uma vez, à semelhança do que aconteceu para o benzeno, suspeitou-se da existência de alguma actividade biológica, mas neste caso os microrganismos não apresentaram capacidade de biodegradar o contaminante (Figuras 3.4 (a) e (b)). A quantificação da biomassa no final do ensaio também apontou para a presença de microrganismo, embora em reduzida quantidade (Figura 3.38);
- ✓ para o nível de contaminação estudado, foi possível remediar o solo quer por bio-remediação quer por bio-ventilação (Figura 3.34 (a)); dez dias foi o tempo necessário

para atingir o nível residual de contaminante ($< 0,5 \text{ mg L}^{-1}$ na fase gasosa), nos dois modos de remediação. As eficiências de remediação (Figura 3.38) também foram muito semelhantes (99,5 e 99,6 %) tal como para o benzeno;

- ✓ à semelhança do benzeno, comparando as evoluções das concentrações de contaminante, de oxigénio e de dióxido de carbono, verificou-se que a respirometria respondeu sem atraso significativo e retratou adequadamente a bio-degradação (Figura 3.34 (a) e (b)).

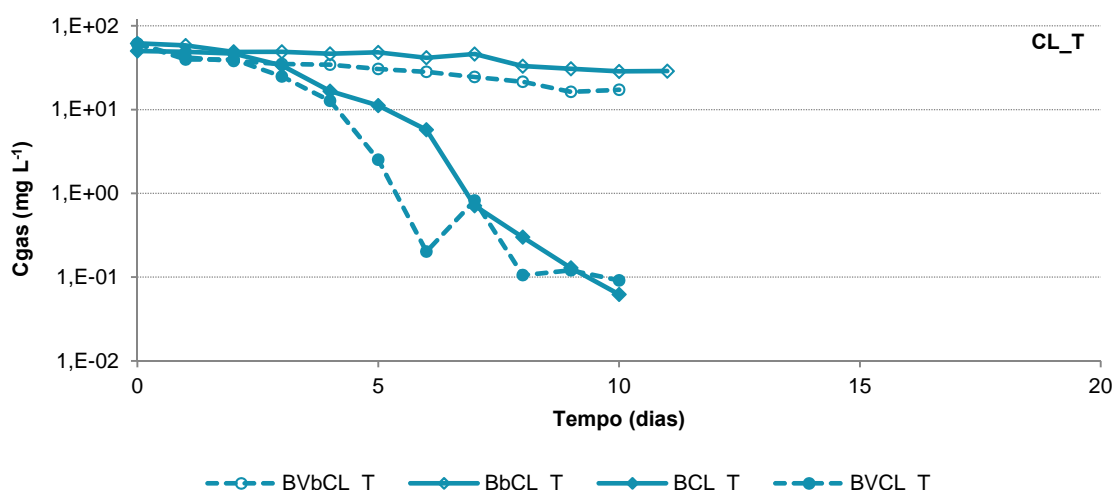


(a)

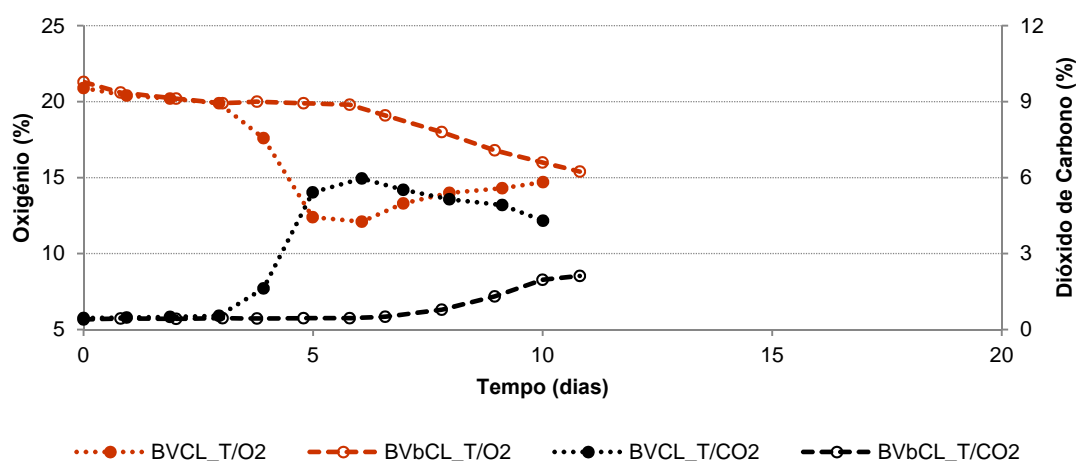


(b)

Figura 3.33 – Ensaio de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em calcário (CL) contaminado com 200 mg kg^{-1} de benzeno (B). (a) Evolução da concentração de benzeno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O_2 e CO_2 na fase gasosa.



(a)



(b)

Figura 3.34 – Ensaio de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em calcário (CL) contaminado com 200 mg kg⁻¹ de tolueno (T). (a) Evolução da concentração de tolueno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O₂ e CO₂ na fase gasosa.

A análise dos resultados obtidos nos ensaios em calcário contaminado com 200 mg kg⁻¹ de etilbenzeno (BVbCL_E, BbCL_E, BVCL_E e BCL_E), Figuras 3.35 e 3.38, permitiu verificar que:

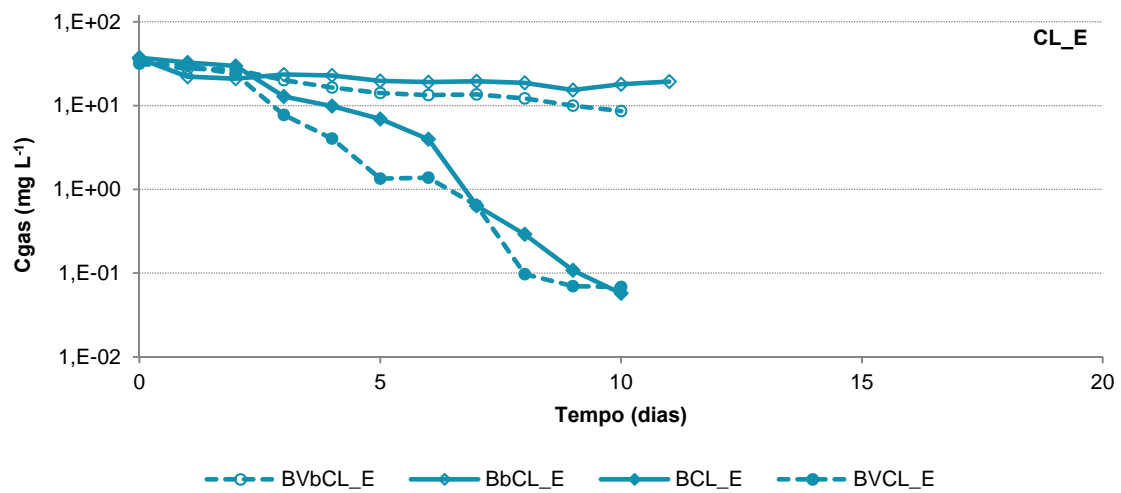
- ✓ no ensaio de bio-remediação não inoculado (BbCL_E), após estabelecimento do equilíbrio no sistema, as concentrações na fase gasosa mantiveram-se aproximadamente constantes, tal como expectável;
- ✓ no ensaio de bio-ventilação não inoculado (BVbCL_E), a concentração de contaminante na fase gasosa vai diminuindo ligeiramente ao longo do tempo resultante da advecção durante a ventilação. Embora a evolução das concentrações de contaminante na fase gasosa não evidenciassem actividade biológica, as concentrações de oxigénio e de dióxido de carbono sofreram ligeiras alterações a partir do quinto dia

até ao final do ensaio; mais uma vez suspeitou-se da existência de alguma actividade biológica devido à presença de microrganismos que não apresentavam capacidade de biodegradar o etilbenzeno (Figuras 3.35 (a) e (b));

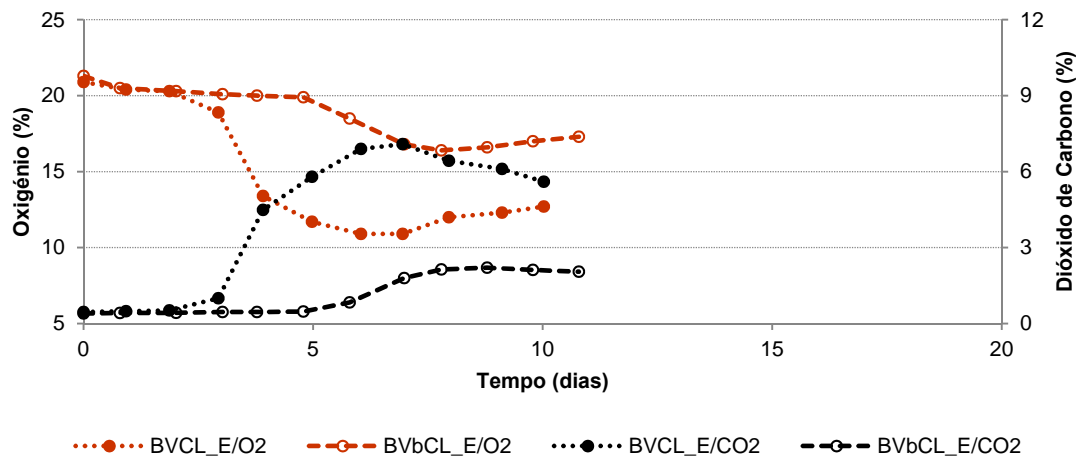
- ✓ foi possível remediar o solo por bio-remediação (BCL_E) e por bio-ventilação (BVCL_E) em dez dias. As eficiências finais foram muito boas, 99,5 % nos dois casos (Figura 3.38);
- ✓ à semelhança do que se verifica nos ensaios realizado com benzeno e com tolueno, a comparação das concentrações de contaminante, de oxigénio e de dióxido de carbono, ao longo do tempo, voltaram a evidenciar que a respirometria retratou adequadamente a bio-degradação, respondendo sem atraso significativo (Figura 3.35 (a) e (b));
- ✓ os resultados obtidos nos ensaios de remediação de calcário contaminado com tolueno e com o etilbenzeno apresentaram grandes semelhanças, principalmente no que respeita à evolução da concentração de contaminante na fase gasosa (Figuras 3.34 (a) e 3.35 (a)).

A análise dos resultados obtidos nos ensaios em calcário contaminado com 200 mg kg⁻¹ de xileno (BVbCL_X, BbCL_X, BVCL_X e BCL_X), Figuras 3.36 e 3.38, permitiu verificar que:

- ✓ nos ensaios não inoculados (BVbCL_X e BbCL_X), verificou-se grande proximidade de resultados na evolução temporal da concentração de contaminante na fase gasosa;
- ✓ para o nível de contaminação estudado, é possível remediar o solo quer por bio-remediação (BCL_X) quer por bio-ventilação (BVCL_X). As eficiências finais foram idênticas nos dois ensaios (98,6 e 98,2 %), mas o tempo de remediação foi muito superior no ensaio de bio-remediação (11 e 17 dias) e o valor da biomassa inferior ($3,9 \times 10^6$ e $6,4 \times 10^5$ CFU mL⁻¹). As diferenças verificadas revelaram dificuldade de adaptação dos microrganismos ao xileno em sistema fechado (Figura 3.36 (a));
- ✓ comparando as evoluções das concentrações de contaminante, de oxigénio e de dióxido de carbono verificou-se, de novo, que a respirometria respondeu adequadamente (Figura 3.36 (a) e (b)).

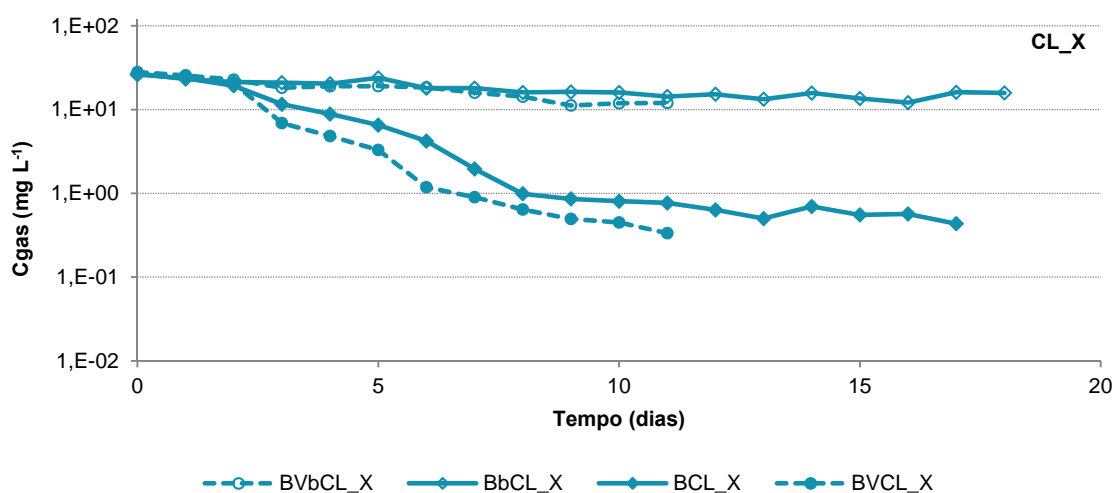


(a)

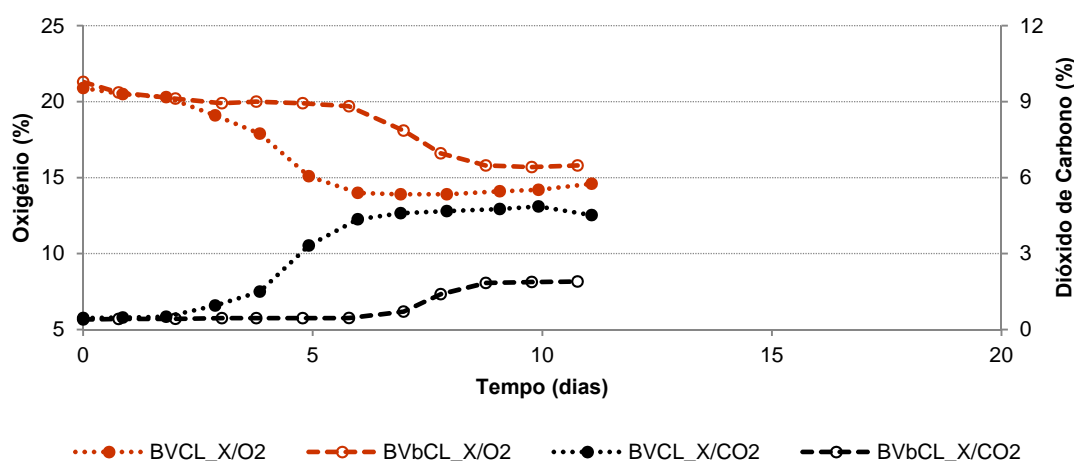


(b)

Figura 3.35 – Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em calcário (CL) contaminado com 200 mg kg⁻¹ de etilbenzeno (E). (a) Evolução da concentração de etilbenzeno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O₂ e CO₂ na fase gasosa.



(a)



(b)

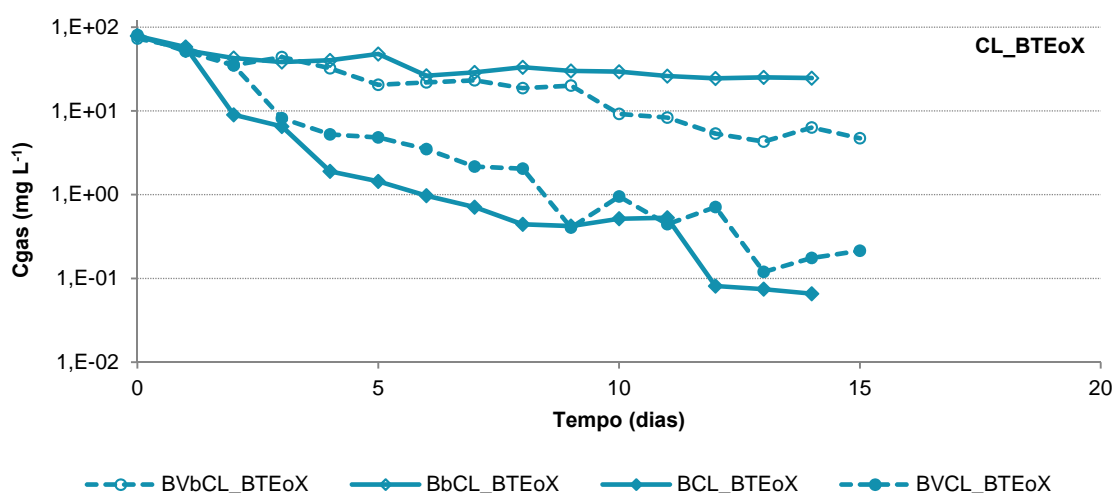
Figura 3.36 – Ensaio de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em calcário (CL) contaminado com 200 mg kg⁻¹ de xileno (X). (a) Evolução da concentração de xileno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O₂ e CO₂ na fase gasosa.

A análise dos resultados obtidos nos ensaios em calcário contaminado com 200 mg kg⁻¹ da mistura BTEoX (BVbCL_BTEoX, BbCL_BTEoX, BVCL_BTEoX e BCL_BTEoX), Figuras 3.37 e 3.38, permitiu verificar que:

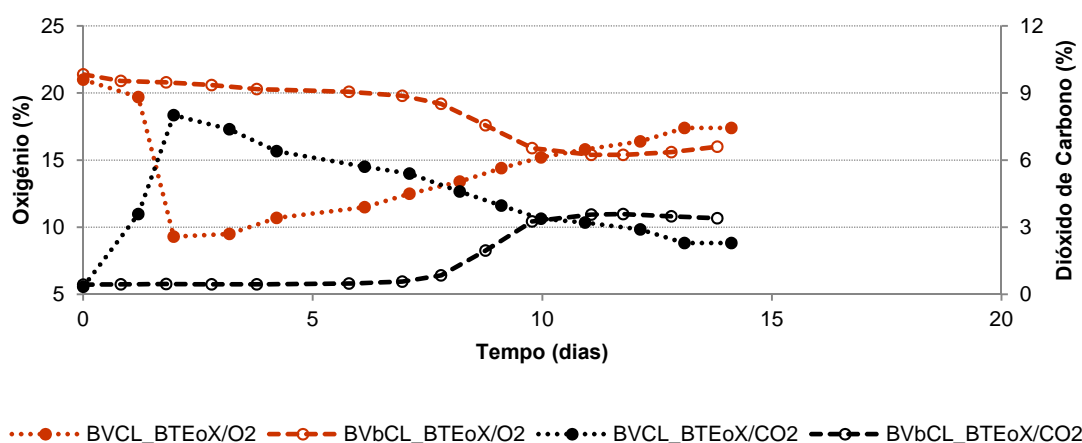
- ✓ no ensaio de bio-remediação não inoculado (BbCL_BTEoX), após estabelecimento do equilíbrio no sistema, as concentrações na fase gasosa mantiveram-se, uma vez mais, aproximadamente constantes.
- ✓ no ensaio de bio-ventilação não inoculado (BVbCL_BTEoX), verificou-se uma considerável diminuição da concentração de contaminante na fase gasosa a partir do nono dia, com estabilização ao décimo segundo dia, o que indicou actividade biológica neste período. Esta actividade biológica é confirmada pela respirometria,

embora a quantificação da biomassa no final dos ensaios (Figura 3.37 (a) e (b) e Figura 3.38) não aponte neste sentido;

- ✓ para o nível de contaminação estudado, foi possível remediar o solo quer por bio-remediação (BCL_BTEoX) quer por bio-ventilação (BVCL_BTEoX); os tempos de remediação foram próximos, havendo apenas um dia de diferença. A partir dos nove dias, também as eficiências de remediação foram muito semelhantes (99,5 e 99,8 %);
- ✓ com a mistura BTEoX, à semelhança do que se verificou nos outros ensaios realizados em calcário, também houve concordância das evoluções das concentrações de contaminante, de oxigénio e de dióxido de carbono; relevando que a respirometria respondeu sem atraso significativo e retratou adequadamente a bio-degradação (Figura 3.37(a) e (b)).



(a)

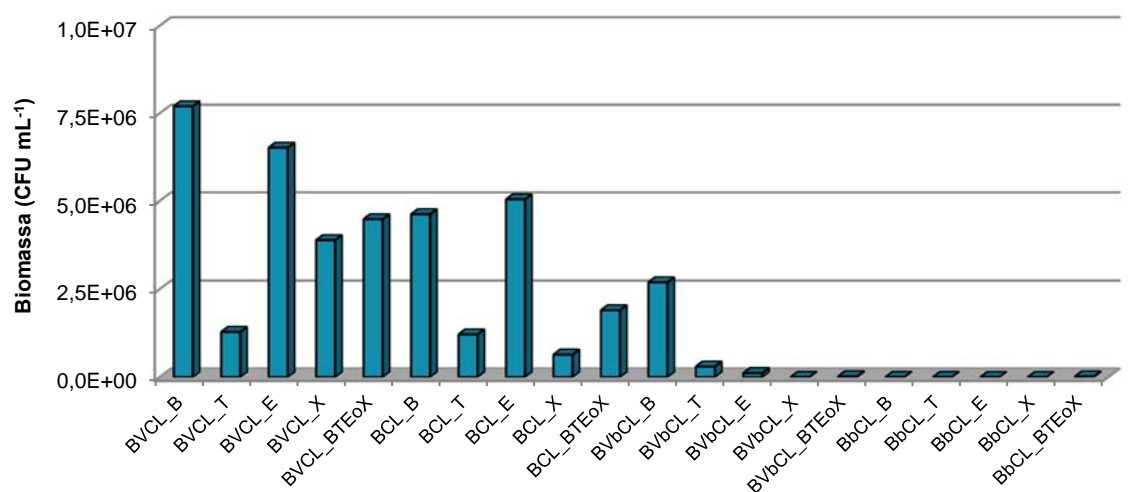


(b)

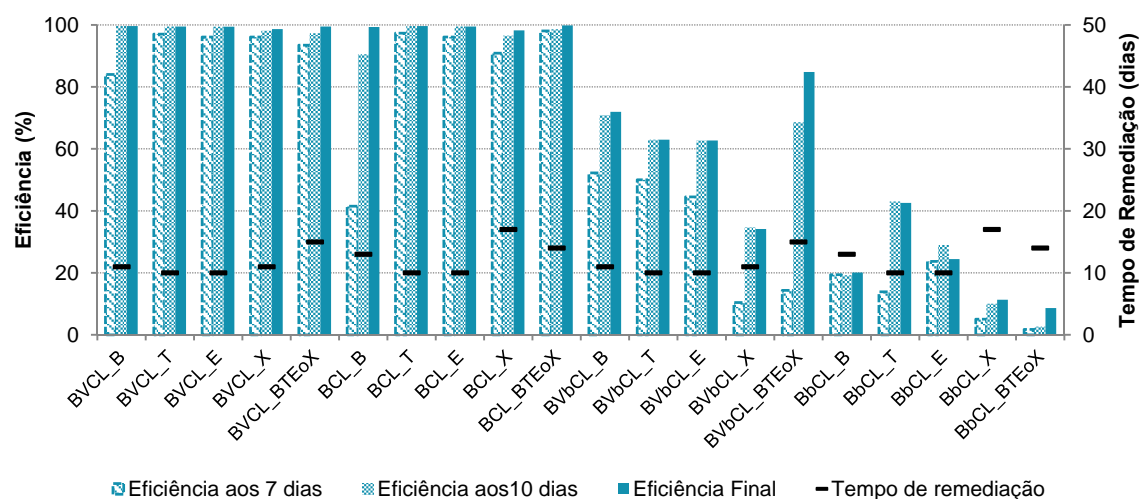
Figura 3.37 – Ensaio de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em calcário (CL) contaminado com $200\ mg\ kg^{-1}$ da mistura BTEoX. (a) Evolução da concentração de BTEoX na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O_2 e CO_2 na fase gasosa.

Na quantificação da biomassa no final dos ensaios (Figura 3.38 (a)), verificou-se que a biomassa desenvolvida nos ensaios de bio-ventilação inoculados foi superior à dos ensaios de bio-remediação inoculados, em todos os contaminantes. Nos ensaios não inoculados a biomassa final foi, como seria de esperar, muito baixa, com exceção do ensaio ventilado em solo contaminado com benzeno.

Nos ensaios inoculados, as eficiências finais (Figura 3.38 (b)) foram sempre muito elevadas (superiores a 98 %) e os tempos de remediação curtos, variando entre dez e quinze dias nos ensaios de bio-ventilação e entre dez e dezassete dias nos ensaios de bio-remediação.



(a)



(b)

Figura 3.38 – Ensaios de remediação realizados em calcário (BCL, BVCL, BbCL e BVbCL) contaminado com benzeno (B) tolueno (T), etilbenzeno (E), xileno (X) e BTEoX. (a) Quantificação da biomassa no final dos ensaios; (b) Eficiência teórica determinada após 7 dias de ensaio, após 10 dias de ensaio e no final dos ensaios com respectivo tempo de remediação.

Com base nos valores experimentais da evolução da concentração de contaminante na fase gasosa foram avaliadas as cinéticas das reacções, aplicando uma rotina de cálculo desenvolvida por Bradley Ridder e apresentada no Anexo VI (Ridder, 2010); os resultados obtidos encontram-se sintetizados na Tabela 3.10, na qual se indica a ordem da reacção (α), a constante cinética (K_c) e o coeficiente de determinação (R^2). Os resultados obtidos permitiram verificar que a ordem da reacção estava, na maioria dos casos, compreendida entre zero e um, crescendo com a diminuição da pressão de vapor do contaminante. Para o mesmo contaminante, é quase sempre maior no ensaio de bio-ventilação. A constante cinética aumentou com a diminuição da pressão de vapor do contaminante e, para o mesmo contaminante, foi quase sempre menor no ensaio de bio-ventilação.

Tabela 3.10 – Avaliação da cinética dos ensaios inoculados realizados em calcário.

	Ensaio	Ordem	K_c ($\text{mg}^{\alpha-1} \text{L}^{1-\alpha} \text{h}^{-1}$)	R^2
Bio-remediação	BCL_B	0,0	$3,38 \times 10^{-1}$	0,962
	BCL_T	0,7	$4,63 \times 10^{-2}$	0,971
	BCL_E	0,8	$3,75 \times 10^{-2}$	0,977
	BCL_X	1,7	$6,67 \times 10^{-3}$	0,930
	BCL_BTEoX	1,1	$1,75 \times 10^{-2}$	0,921
Bio-ventilação	BVCL_B	0,3	$1,26 \times 10^{-1}$	0,945
	BVCL_T	0,9	$3,50 \times 10^{-2}$	0,905
	BVCL_E	1,0	$3,13 \times 10^{-2}$	0,972
	BVCL_X	1,4	$1,46 \times 10^{-2}$	0,982
	BVCL_BTEoX	1,1	$1,58 \times 10^{-2}$	0,923

3.5.1.2. ENSAIOS REALIZADOS EM GRANITO

Os resultados obtidos nos ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação realizados em granito encontram-se sintetizados nas Figuras 3.39 a 3.44.

A análise dos resultados obtidos nos ensaios em granito contaminado com 200 mg kg^{-1} de benzeno (BVbSR_B, BbSR_B, BVSR_B, BVSR2_B, BSR_B e BSR2_B), Figuras 3.39 e 3.44, permitiu verificar que:

- ✓ no ensaio de bio-ventilação não inoculado (BVbSR_B), a concentração do benzeno também foi diminuindo ligeiramente ao longo do tempo. Esta diminuição acompanha a ocorrida na fase inicial dos ensaios de bio-ventilação inoculada, mantendo-se com

evolução constante até ao final do ensaio não inoculado, pelo que deverá estar exclusivamente relacionada com as perdas por advecção. A quantificação da biomassa no final do ensaio (Figura 3.44 (a)) e as evoluções das concentrações de oxigénio e dióxido de carbono (Figuras 3.39(b)) neste ensaio não inoculado também não revelaram existência de actividade biológica;

- ✓ no ensaio inoculado de bio-remediação BSR_B, o benzeno apresentou biodegradação equivalente à do ensaio branco, contudo, no duplicado BSR2_B e nos ensaios de bio-ventilação, ocorreu total degradação. O tempo necessário para atingir o nível residual de contaminante foi, no caso do ensaio de bio-remediação, trinta e dois dias, enquanto nos ensaios de bio-ventilação foram, em média, vinte dias (Figuras 3.39(a) e 3.44). As eficiências teóricas calculadas no final dos ensaios BSR2_B, BVSR_B e BVSR2_B apontaram para valores elevados, compreendidos entre 99,7 e 99,9 % (Figura 3.44 (b)). Estes dados indicaram que será possível remediar o solo, quer por bio-remediação quer por bio-ventilação, embora com tempos de reabilitação diferentes;
- ✓ a semelhança das curvas de evolução das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas nos ensaios BSR_B e BbSR_B pode ser explicada pelo não funcionamento do consórcio microbiano utilizado na bio-amplificação. Nestes ensaios verificou-se uma ligeira diminuição da concentração de benzeno na fase gasosa ao longo do tempo.
- ✓ à semelhança do que aconteceu com os ensaios realizados em calcário, a respirometria respondeu sem atraso significativo e retratou adequadamente a bio-degradação (Figura 3.39(a) e (b)).

A análise dos resultados obtidos nos ensaios em granito contaminado com 200 mg kg⁻¹ de tolueno (BVbSR_T, BbSR_T, BVSR_T, BVSR2_T, BSR_T e BSR2_T), Figuras 3.40 e 3.44, permitiu verificar que:

- ✓ no ensaio não inoculado de bio-remediação (BbSR_T), verificou-se uma ligeira diminuição da concentração de tolueno na fase gasosa ao longo do tempo, no entanto a quantificação da biomassa no final do ensaio (Figura 3.44(a)) não apontou para a existência de actividade biológica;
- ✓ no ensaio de bio-ventilação não inoculado (BVbSR_T), a concentração de tolueno foi diminuindo ligeiramente ao longo do tempo por advecção. As evoluções das concentrações de oxigénio e dióxido de carbono (Figura 3.40 (b)) , bem como a quantificação da biomassa (Figura 3.44(a)), não revelaram existência de actividade biológica;
- ✓ foi possível remediar o solo quer por bio-remediação (BSR_T e BSR2_T) quer por bio-ventilação (BVSR_T e BVSR2_T), embora os tempos de remediação nos ensaios sem circulação de ar tenham sido significativamente superiores. Nos ensaios de bio-degradação foram necessários, em média, vinte e sete dias e nos ensaios de bio-ventilação foram, em média, dezoito dias e meio (Figura 3.44 (b)). As eficiências

inais de remediação foram elevadas nos dois tipos de ensaio, compreendidas entre 99,6 e 99,9 % (Figura 3.44 (a));

- ✓ mais uma vez se verificou que a análise respirométrica é uma ferramenta adequada à monitorização da bio-degradação (Figura 3.40(a) e (b)).

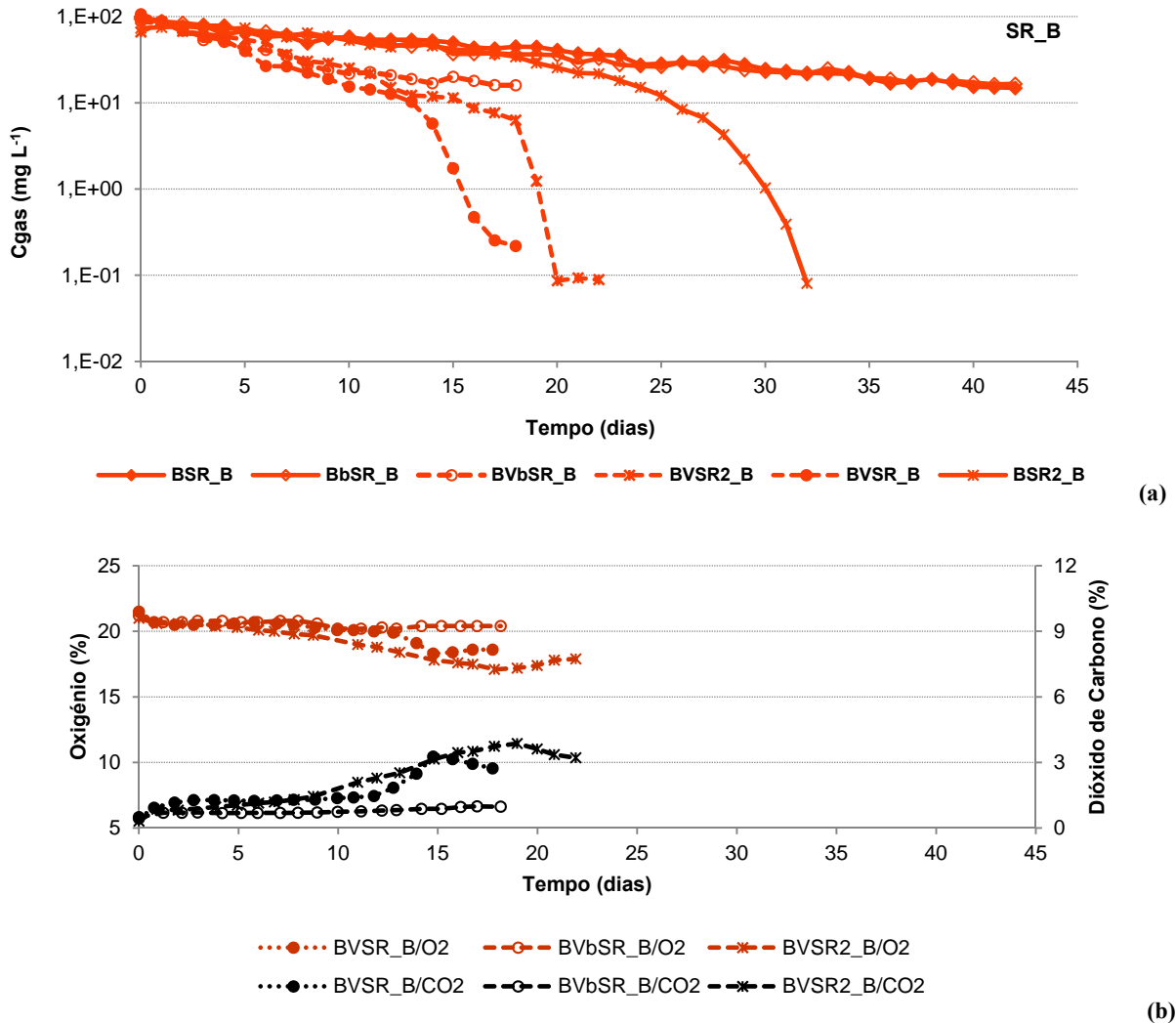


Figura 3.39 – Ensaio de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em granito (SR) contaminado com 200 mg kg⁻¹ de benzeno (B). (a) Evolução da concentração de benzeno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O₂ e CO₂ na fase gasosa.

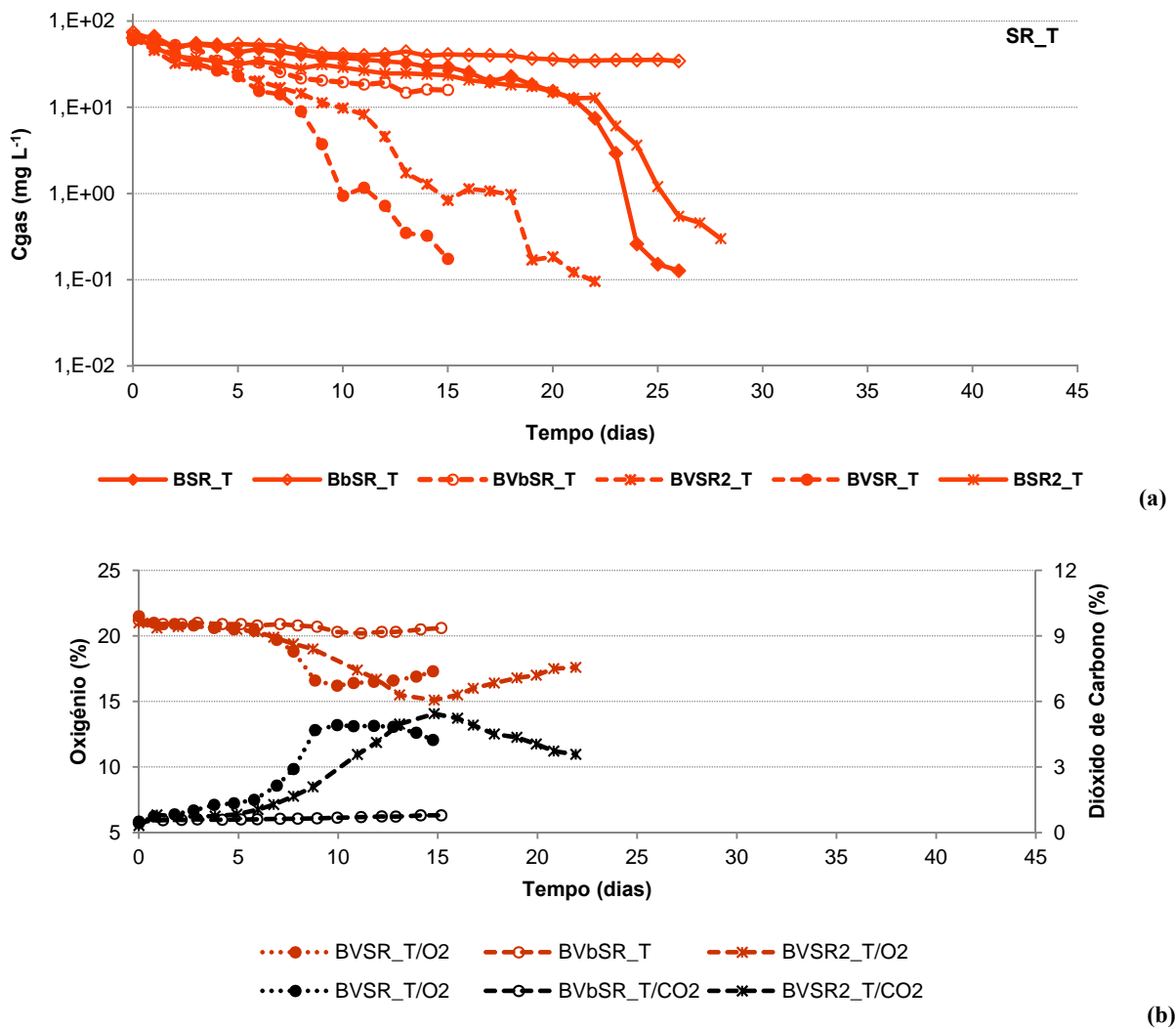


Figura 3.40 – Ensaio de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em granito (SR) contaminado com 200 mg kg⁻¹ de tolueno (T). (a) Evolução da concentração de tolueno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O₂ e CO₂ na fase gasosa.

A análise dos resultados obtidos nos ensaios em granito contaminado com 200 mg kg⁻¹ de etilbenzeno (BVbSR_E, BbSR_E, BVSR_E, BVSR2_E, BSR_E e BSR2_E), Figuras 3.41 e 3.44, permitiu verificar que:

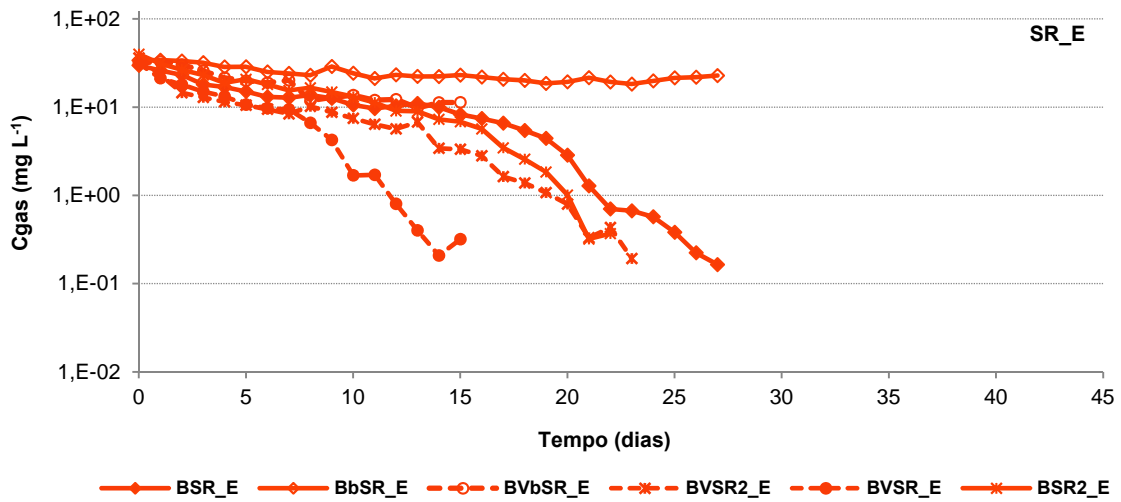
- ✓ no ensaio não inoculado de bio-remediação (BbSR_E), verificou-se uma ligeira diminuição da concentração de etilbenzeno na fase gasosa ao longo do tempo (Figura 3.41(a)), no entanto, como expectável, a biomassa não apontou para a existência de actividade biológica (Figura 3.44 (a));
- ✓ no ensaio de bio-ventilação não inoculado (BVbSR_E), a concentração diminuiu ligeiramente ao longo do tempo devido à ventilação diária. As evoluções das concentrações de oxigénio e dióxido de carbono revelaram existência de uma ligeira

actividade biológica entre o oitavo e o décimo primeiro dia de ensaio; esta possível actividade biológica não foi confirmada pela quantificação da biomassa no final do ensaio (Figuras 3.41(b) e 3.44 (a));

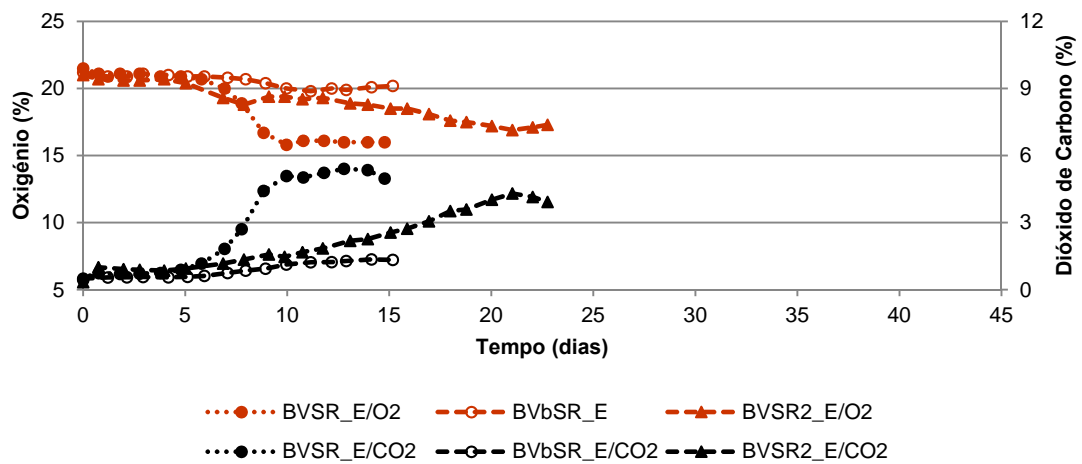
- ✓ foi possível remediar o solo quer por bio-remediação (BSR_E e BSR2_E) quer por bio-ventilação (BVSr_E e BVSr2_E), embora os tempos de remediação nos ensaios de bio-remediação tenham sido significativamente superiores (Figuras 3.41(a) e 3.44). Nos ensaios de bio-degradação foram necessários, em média, vinte e cinco dias, enquanto nos ensaios de bio-ventilação foram necessários, em média, dezoito dias e meio. Saliente-se que, nos duplicados, os resultados obtidos na bio-remediação e na bio-ventilação foram muito semelhantes. As eficiências teóricas calculadas no final dos ensaios apontaram para valores elevados compreendidos entre 99,4 e 99,7 % (Figura 3.44 (b));
- ✓ comparando as evoluções no tempo das concentrações na fase gasosa de etilbenzeno, de oxigénio e de dióxido de carbono, verificou-se que a respirometria respondeu sem atraso significativo e retratou adequadamente a bio-degradação (Figura 3.41(a) e (b)).

A análise dos resultados obtidos nos ensaios em granito contaminado com 200 mg kg⁻¹ de xileno (BVbSR_X, BbSR_X, BVSr_X, BVSr2_X, BSR_X e BSR2_X), Figuras 3.42 e 3.44, permitiu verificar que:

- ✓ no ensaio não inoculado de bio-remediação (BbSR_X), verificou-se, tal como nos ensaios anteriores, uma ligeira diminuição da concentração de xileno na fase gasosa ao longo do tempo;
- ✓ no ensaio de bio-ventilação não inoculado (BVbSR_X), a concentração do xileno também foi diminuindo ligeiramente ao longo do tempo. As evoluções no tempo das concentrações de oxigénio e de dióxido de carbono (Figura 3.42 (b)) e os valores da biomassa (Figura 3.44 (a)) não revelaram existência actividade biológica durante este ensaio;
- ✓ a bio-remediação e a bio-ventilação reabilitaram o granito contaminado com xileno. Nos ensaios de bio-remediação (BSR_X e BSR2_X) foram necessários, em média, quarenta e dois dias, enquanto nos ensaios de bio-ventilação (BVSr_X e BVSr2_X) foram necessários, em média, vinte e sete dias e meio. Sendo de salientar a semelhança das curvas das réplicas tanto nos ensaios de bio-remediação como nos ensaios de bio-ventilação, o que confirmou a reprodutibilidade do processo (Figuras 3.42 (a) e 3.44 (b)). As eficiências teóricas calculadas no final dos ensaios apontaram para valores elevados, 99,2 e 99,3 % nos ensaios de bio-ventilação e 98,4 e 98,6 % nos ensaios de bio-remediação (Figura 3.44 (b));
- ✓ comparando as evoluções no tempo das concentrações de contaminante, de oxigénio e de dióxido de carbono, constatou-se que a respirometria respondeu sem atraso significativo e retratou adequadamente a bio-degradação (Figura 3.42 (a) e (b)).



(a)



(b)

Figura 3.41 – Ensaio de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em granito (SR) contaminado com $200\ mg\ kg^{-1}$ de etilbenzeno (E). (a) Evolução da concentração de etilbenzeno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O_2 e CO_2 na fase gasosa.

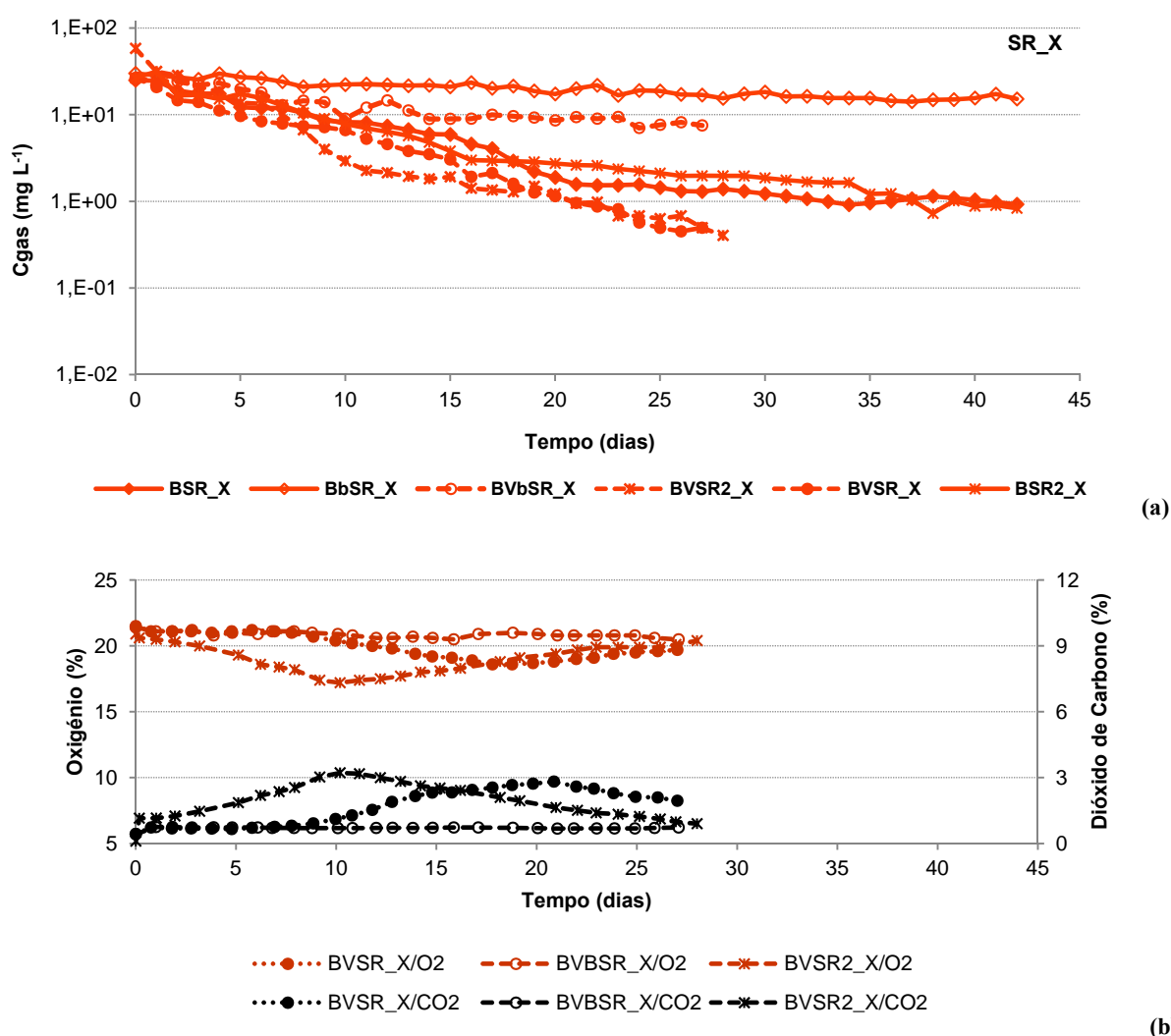


Figura 3.42 – Ensaio de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em granito (SR) contaminado com $200\ mg\ kg^{-1}$ de xileno (X). (a) Evolução da concentração de xileno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O_2 e CO_2 na fase gasosa.

A análise dos resultados obtidos nos ensaios em granito contaminado com $200\ mg\ kg^{-1}$ da mistura BTEoX (BVbSR_BTEoX, BbSR_BTEoX, BVSR_BTEoX, BVSR2_BTEoX, BSR_BTEoX e BSR2_BTEoX), Figuras 3.43 e 3.44, permitiu verificar que:

- ✓ no ensaio não inoculado de bio-remediação (BbSR_BTEoX), verificou-se a habitual diminuição na concentração da mistura dos contaminantes na fase gasosa ao longo do tempo;
- ✓ no ensaio de bio-ventilação não inoculado (BVbSR_BTEoX), a concentração também diminuiu ligeiramente, por advecção, ao longo do tempo. As evoluções no tempo das concentrações de oxigénio e de dióxido de carbono revelaram existência de uma ligeira actividade biológica ao décimo dia de ensaio e por um período de dois dias,

estabilizando de seguida; esta ligeira actividade biológica não foi confirmada pelos resultados obtidos na quantificação da biomassa (Figuras 3.43 (b) e 3.44 (a));

- ✓ foi possível remediar o solo por bio-remediação e por bio-ventilação, sendo necessários trinta dias no ensaio de bio-remediação e catorze dias no ensaio de bio-ventilação para atingir a concentração residual. As eficiências finais obtidas foram elevadas e idênticas (99,7 %). A quantificação da biomassa no final do ensaio (Figura 3.44 (a)) revelou que o desenvolvimento da biomassa foi muito superior no ensaio de bio-ventilação ($2,78 \times 10^6$ e $2,67 \times 10^5$);
- ✓ à semelhança dos ensaios realizado com benzeno, com tolueno, com etilbenzeno e com xileno, as evoluções no tempo das concentrações de contaminante, de oxigénio e de dióxido de carbono revelaram que a respirometria respondeu sem atraso significativo e retratou adequadamente a bio-degradação.

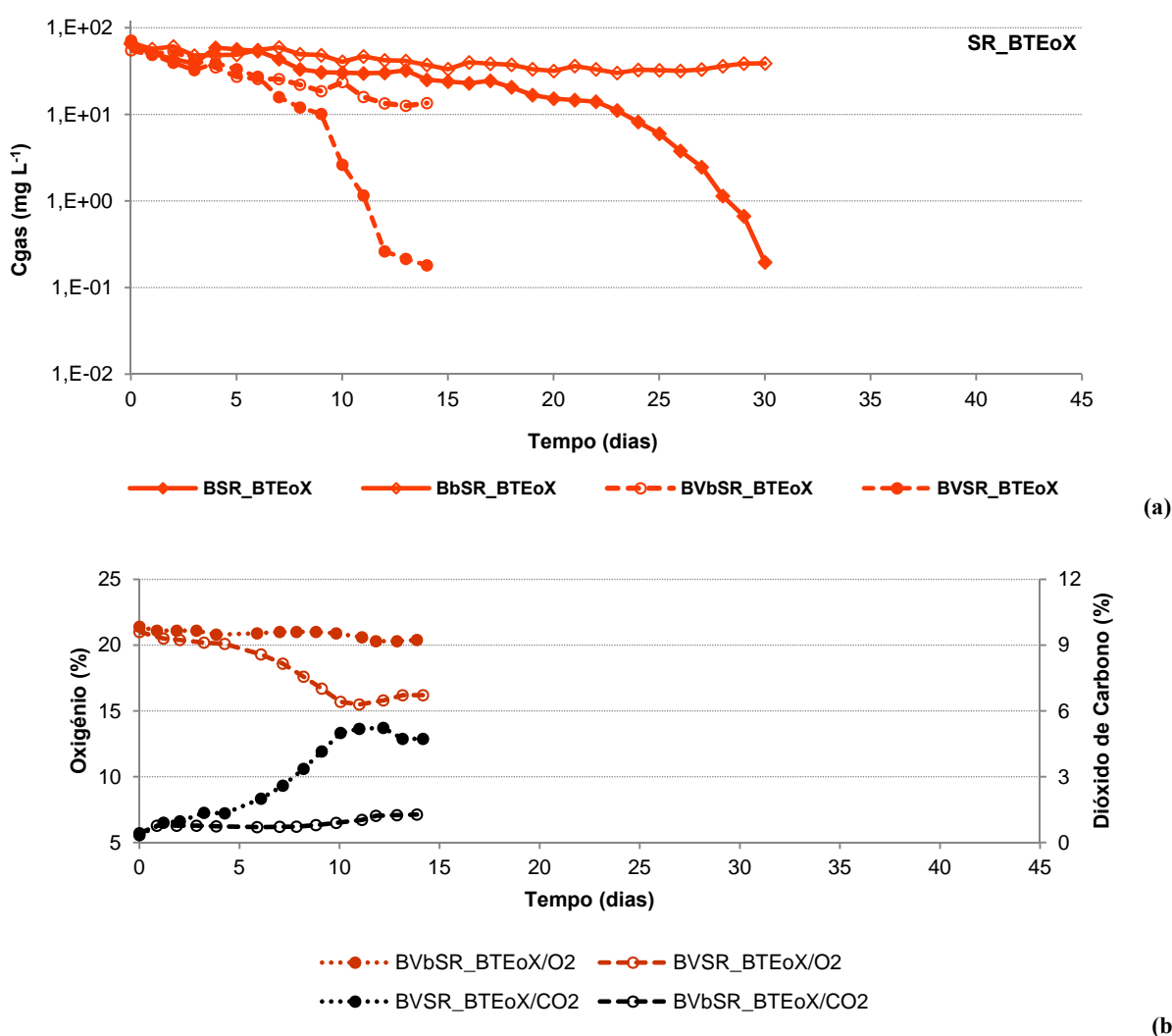
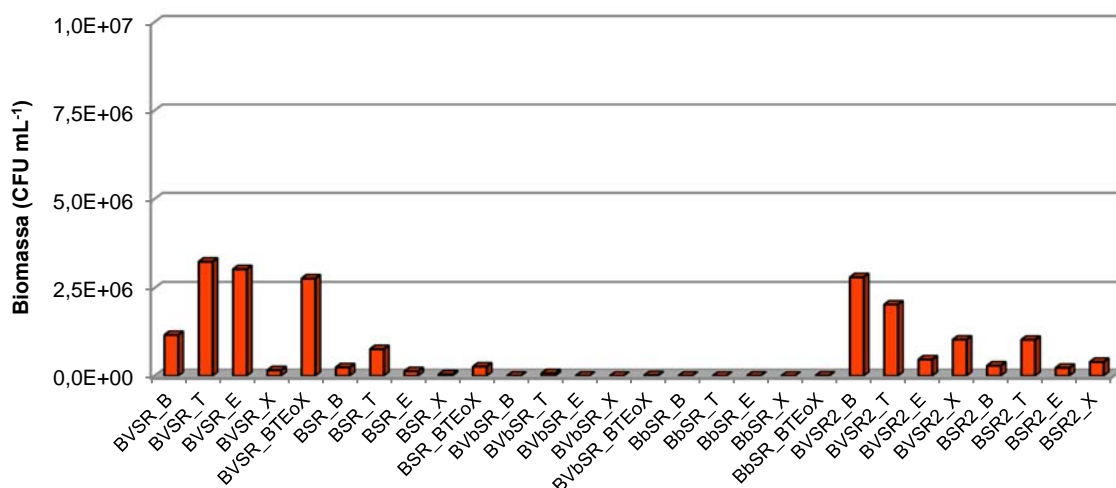
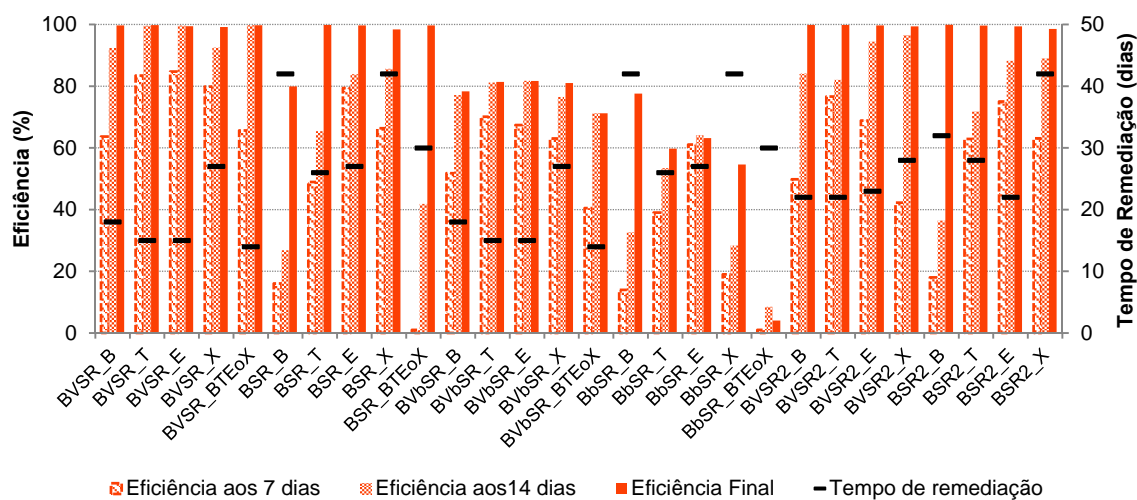


Figura 3.43 – Ensaio de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em granito (SR) contaminado com 200 mg kg⁻¹ da mistura BTEoX. (a) Evolução da concentração de BTEoX na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O₂ e CO₂ na fase gasosa.

No final dos ensaios inoculados, verificou-se que a biomassa desenvolvida (Figura 3.44 (a)) era superior na bio-ventilação. Nos ensaios não inoculados a biomassa final foi, como seria de esperar, muito baixa. Para o conjunto de ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação realizados no solo granítico (Figura 3.44 (b)), as eficiências foram quase sempre muito elevadas e os tempos de remediação muito variáveis, estando compreendidos entre 14 e 28 dias, nos ensaios de bio-ventilação, e entre 22 e 42 dias, nos ensaios de bio-remediação.



(a)



(b)

Figura 3.44 – Ensaios de remediação realizados em granito (BSR, BVSR, BbSR e BVbSR) contaminado com benzeno (B) tolueno (T), etilbenzeno (E), xileno (X) e BTEoX. (a) Quantificação da biomassa no final dos ensaios; (b) Eficiência teórica determinada após 7 dias de ensaio, após 14 dias de ensaio e no final dos ensaios com respectivo tempo de remediação.

Com base nos valores experimentais da evolução da concentração de contaminante na fase gasosa, foram calculadas as cinéticas das reacções segundo (Ridder, 2010). Os resultados obtidos encontram-se sintetizados na Tabela 3.11, na qual se indica a ordem da reacção (α), a constante cinética (K_c) e o coeficiente de determinação (R^2). Os resultados obtidos permitiram verificar que a ordem da reacção esteve, na maioria dos casos, compreendida entre zero e um, só no caso do xileno se obtêm reacções com ordem superior a um. Verificou-se uma tendência, ainda que pouco nítida, de crescimento da ordem da reacção com a diminuição da pressão de vapor do contaminante. Para o mesmo contaminante, a ordem da cinética foi quase sempre maior no ensaio de bio-ventilação, sendo de novo excepção os ensaios realizados com xileno. Nos ensaios de bio-ventilação verificou-se que a constante cinética diminuiu com a diminuição da pressão de vapor do contaminante, não sendo detectada qualquer tendência nos ensaios de bio-remediação.

Tabela 3.11 – Avaliação da cinética dos ensaios inoculados realizados em granito.

	Ensaio	Ordem	K_c ($\text{mg}^{\alpha-1} \text{L}^{1-\alpha} \text{h}^{-1}$)	R^2
Bio-remediação	BSR_B	0,9	$2,50 \times 10^{-3}$	0,979
	BSR2_B	0,1	$8,17 \times 10^{-2}$	0,989
	BSR_T	0,0	$1,14 \times 10^{-1}$	0,972
	BSR2_T	-0,1	$8,17 \times 10^{-2}$	0,959
	BSR_E	0,3	$1,88 \times 10^{-2}$	0,961
	BSR2_E	0,4	$2,54 \times 10^{-2}$	0,987
	BSR_X	1,7	$1,67 \times 10^{-3}$	0,937
	BSR2_X	1,4	$2,08 \times 10^{-3}$	0,969
	BSR_BTEoX	0,3	$3,17 \times 10^{-2}$	0,939
Bio-ventilação	BVSR_B	0,6	$3,54 \times 10^{-2}$	0,976
	BVSR2_B	0,5	$3,67 \times 10^{-2}$	0,984
	BVSR_T	0,8	$2,63 \times 10^{-2}$	0,972
	BVSR2_T	0,8	$1,67 \times 10^{-2}$	0,975
	BVSR_E	0,5	$2,63 \times 10^{-2}$	0,977
	BVSR2_E	0,6	$1,29 \times 10^{-2}$	0,963
	BVSR_X	0,9	$6,67 \times 10^{-3}$	0,991
	BVSR2_X	1,4	$4,58 \times 10^{-3}$	0,974
	BVSR_BTEoX	0,4	$5,54 \times 10^{-2}$	0,957

3.5.1.3. ENSAIOS REALIZADOS EM XISTO

Os resultados obtidos nos ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação realizados em xisto encontram-se sintetizados nas Figuras 3.45 a 3.50.

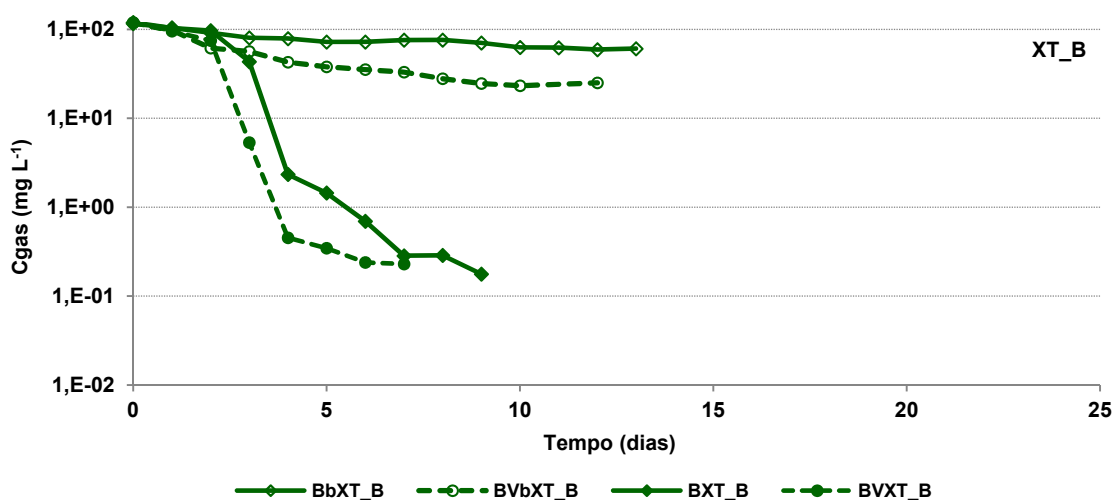
A análise dos resultados obtidos nos ensaios em xisto contaminado com 200 mg kg⁻¹ de benzeno (BVbXT_B, BbXT_B, BVXT_B e BXT_B), Figuras 3.45 e 3.50, permitiu verificar que:

- ✓ no ensaio de bio-remediação não inoculado em solo esterilizado, (BbXT_B), verificou-se que, após estabelecimento do equilíbrio no sistema, as concentrações na fase gasosa se mantinham aproximadamente constantes, como expectável (Figura 3.45 (a));
- ✓ no ensaio de bio-ventilação não inoculado (BVbXT_B), a concentração foi diminuindo ligeiramente ao longo do tempo, tal como nos ensaios anteriores do mesmo tipo. A evolução das concentrações de oxigénio e dióxido de carbono na fase gasosa sugeriu uma leve actividade biológica a partir de quinto dia de ensaio, que não se confirmou na quantificação da biomassa (Figura 3.50);
- ✓ o solo foi descontaminado quer por bio-remediação quer por bio-ventilação. O tempo necessário para atingir o nível residual de contaminante foi de sete dias no ensaio de bio-ventilação e de nove dias no ensaio de bio-remediação. As eficiências finais obtidas foram muito elevadas (99,7%) e iguais (Figura 3.50 (b));
- ✓ comparando as evoluções das concentrações de contaminante, de oxigénio e de dióxido de carbono (Figura 3.45 (a) e (b)), constata-se que a respirometria respondeu sem atraso significativo e retratou adequadamente a bio-degradação.

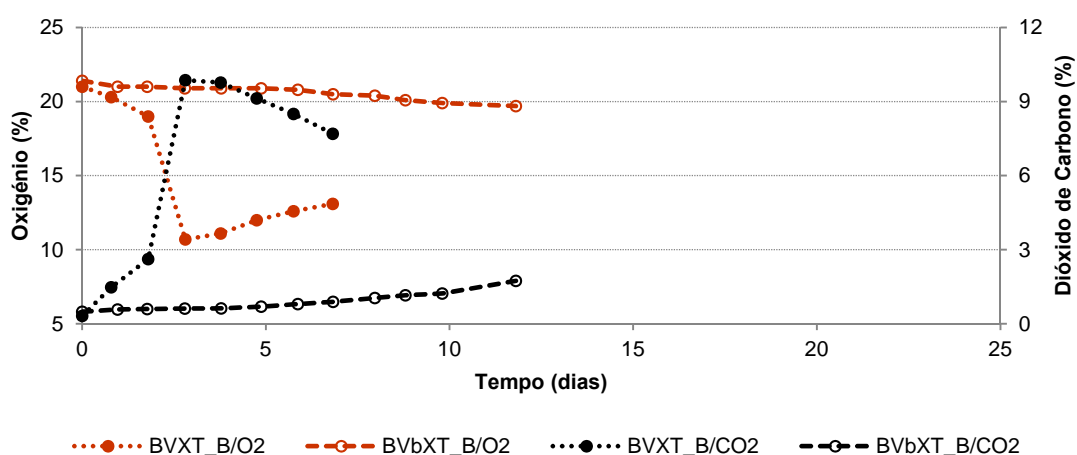
A análise dos resultados obtidos nos ensaios em xisto contaminado com 200 mg kg⁻¹ de tolueno (BVbXT_T, BbXT_T, BVXT_T e BXT_T), Figuras 3.46 e 3.50, permitiu verificar que:

- ✓ no ensaio de bio-remediação não inoculado (BbXT_T) verificou-se que, após estabelecimento do equilíbrio no sistema, as concentrações na fase gasosa se mantinham aproximadamente constantes, como expectável em solos esterilizados (Figura 3.46 (a));
- ✓ no ensaio de bio-ventilação não inoculado (BVbXT_T), a concentração foi reduzindo ligeiramente ao longo do tempo, acentuando-se a diminuição entre o quinto e nono dia e estabilizando posteriormente. Os resultados obtidos com as determinações das concentrações de oxigénio e de dióxido de carbono não foram concordantes com esta evolução, uma vez que revelaram um aumento de CO₂ e diminuição de O₂ a partir do nono dia sem estabilização até ao final do ensaio, o que, embora leve à suposição de actividade biológica, não foi confirmado na quantificação da biomassa (Figuras 3.46 (b) e 3.50 (a));

- ✓ foi possível remediar o solo quer por bio-remediação (BXT_T) quer por bio-ventilação (BVXT_T); a grande diferença residiu no tempo de remediação. O tempo necessário para atingir o nível residual de contaminante foi de sete dias no ensaio de bio-ventilação e de onze dias no ensaio de bio-remediação. As eficiências finais obtidas foram muito elevadas e idênticas, 99,8 e 99,7 % respectivamente (Figura 3.50 (b));
- ✓ mais uma vez a respirometria respondeu sem atraso significativo e retratou adequadamente a bio-degradação, no caso do ensaio inoculado de bio-ventilação. No ensaio não inoculado de bio-ventilação verificou-se alguma discordância nos resultados.

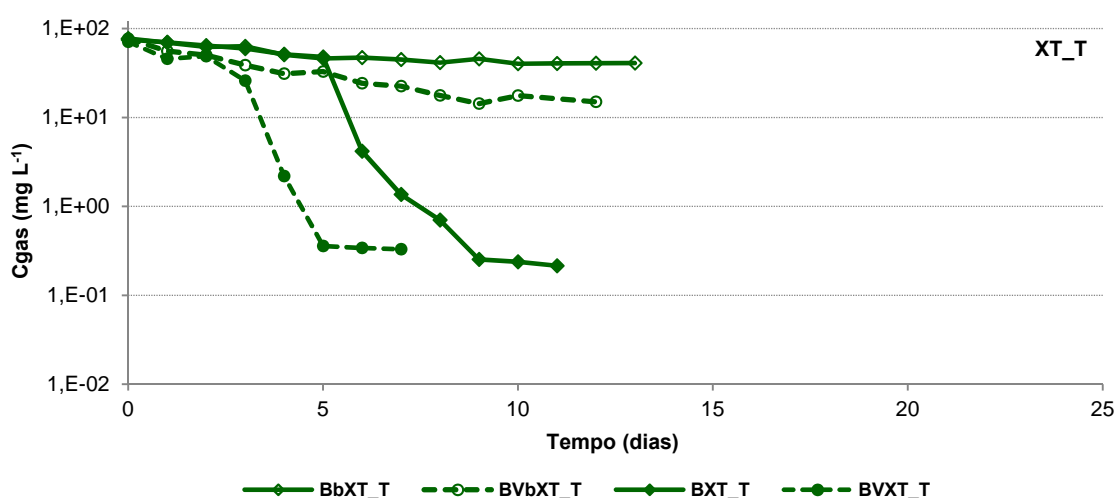


(a)

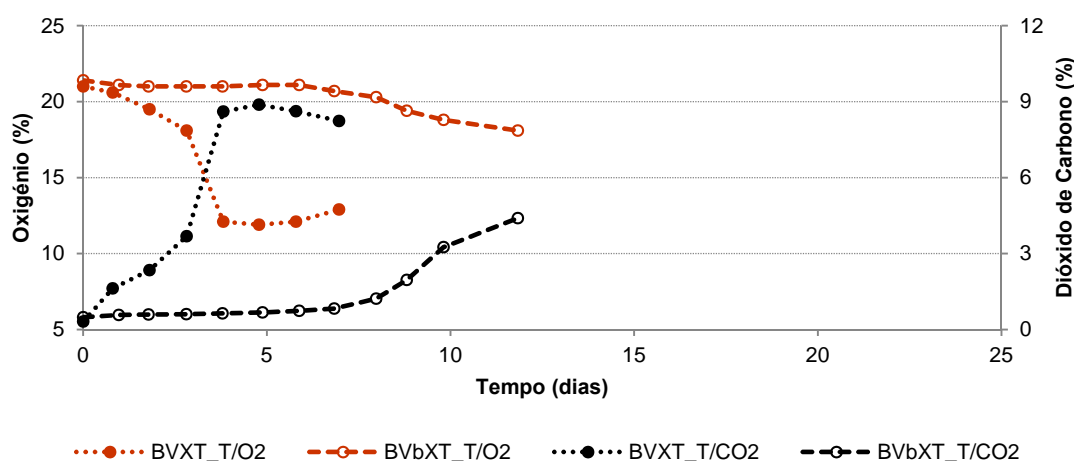


(b)

Figura 3.45 – Ensaio de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em xisto (XT) contaminado com 200 mg kg^{-1} de benzeno (B). (a) Evolução da concentração de benzeno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O_2 e CO_2 na fase gasosa.



(a)



(b)

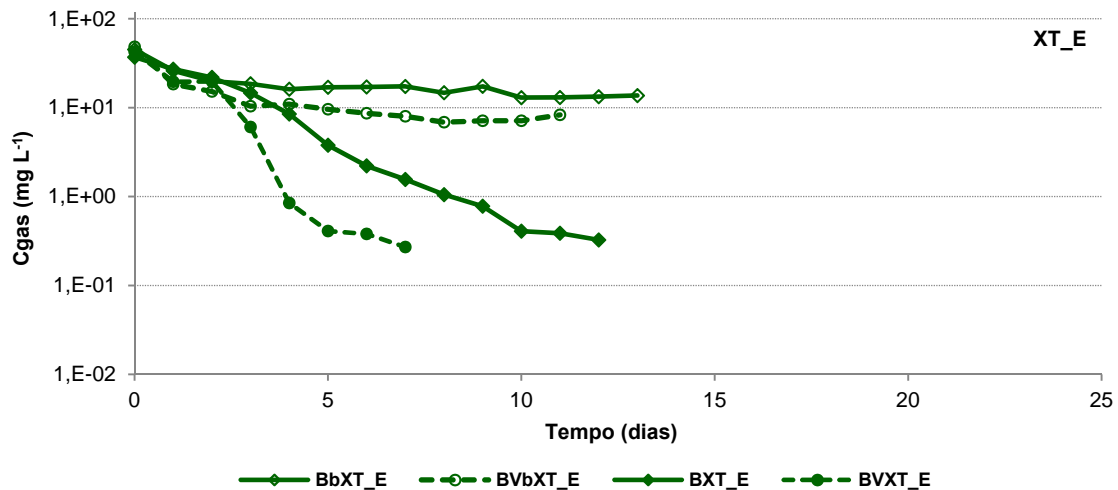
Figura 3.46 - Ensaio de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em xisto (XT) contaminado com $200\ mg\ kg^{-1}$ de tolueno (T). (a) Evolução da concentração de tolueno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O_2 e CO_2 na fase gasosa.

A análise dos resultados obtidos nos ensaios em xisto contaminado com $200\ mg\ kg^{-1}$ de etilbenzeno (BVbXT_E, BbXT_E, BVXT_E e BXT_E), Figuras 3.47 e 3.50, permitiu verificar que:

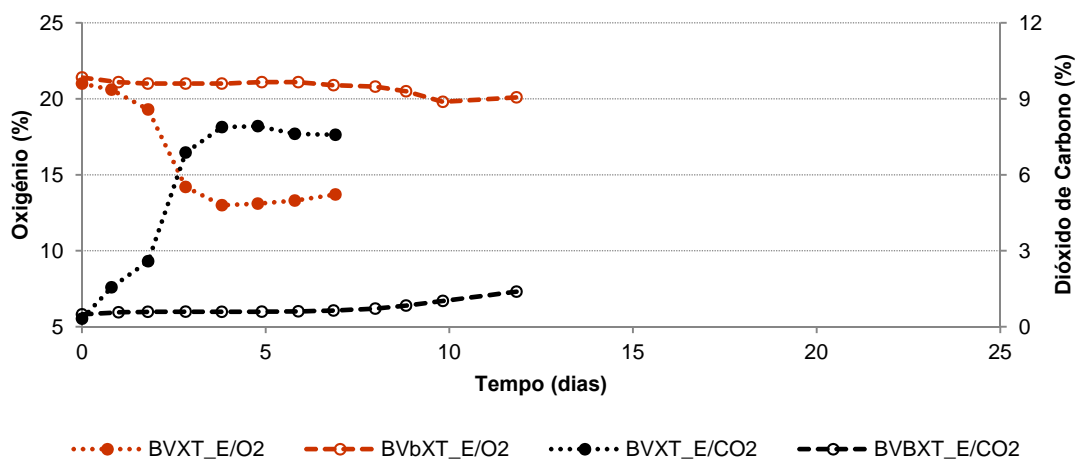
- ✓ no ensaio de bio-remediação não inoculado em solo estéril (BbXT_E) verificou-se que, após estabelecimento do equilíbrio no sistema, as concentrações na fase gasosa se mantiveram aproximadamente constantes, tal como na maioria dos ensaios deste tipo (Figura 3.47 (a));
- ✓ no ensaio de bio-ventilação não inoculado em solo estéril (BVbXT_E), a concentração foi diminuindo ligeiramente ao longo do tempo devido às perdas por advecção. Os resultados obtidos com as determinações das concentrações de oxigénio e de dióxido de carbono revelaram uma insipiente actividade biológica entre o oitavo e o décimo

dia, a qual não se manifestou nas concentrações de etilbenzeno na fase gasosa nem se confirmou na quantificação da biomassa (Figura 3.50);

- ✓ foi possível remediar o solo por bio-remediação (BXT_E) e por bio-ventilação (BVXT_E); o tempo necessário para atingir o nível residual de contaminante foi de sete dias, no ensaio de bio-ventilação e de doze dias, no ensaio de bio-remediação. As eficiências finais obtidas foram elevadas e idênticas, 99,7 e 99,6 %, respectivamente (Figura 3.50 (b));
- ✓ mais uma vez a respirometria respondeu sem atraso significativo e retratou adequadamente a bio-degradação no caso dos ensaios inoculados de bio-ventilação. Nos ensaios não inoculados de bio-ventilação detectou-se uma ligeira diferença, podendo, no entanto, ainda considerar-se a resposta adequada.



(a)



(b)

Figura 3.47 – Ensaio de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em xisto (XT) contaminado com 200 mg kg^{-1} de etilbenzeno (E). (a) Evolução da concentração de etilbenzeno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O_2 e CO_2 na fase gasosa.

A análise dos resultados obtidos nos ensaios em xisto contaminado com 200 mg kg⁻¹ de xileno (BVbXT_X, BbXT_X, BVXT_X e BXT_X), Figuras 3.48 e 3.50, permitiu verificar que:

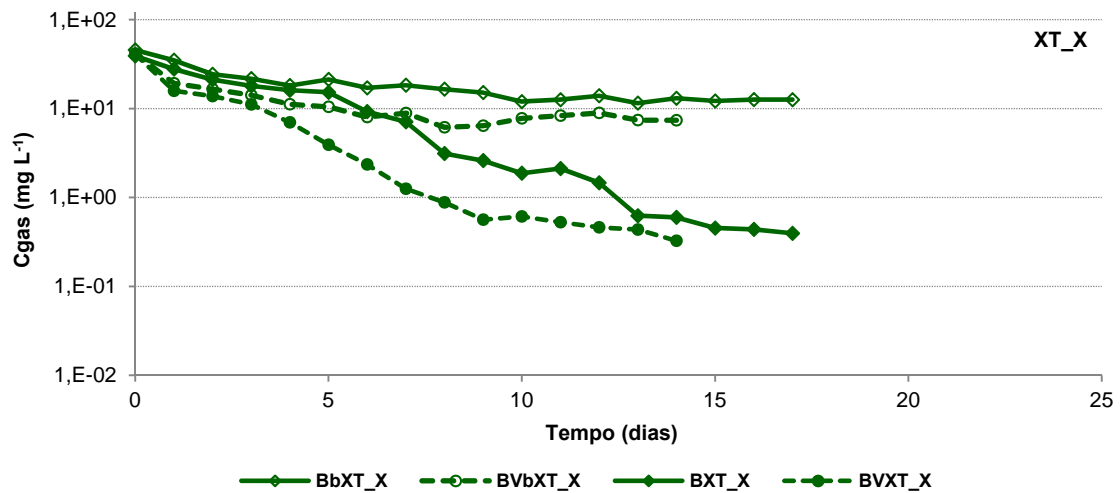
- ✓ de novo, no ensaio de bio-remediação não inoculado (BbXT_X), após estabelecimento do equilíbrio no sistema, as concentrações na fase gasosa mantiveram-se aproximadamente constantes, como o expectável (Figura 3.48 (a));
- ✓ no ensaio de bio-ventilação não inoculado (BVbXT_X), a concentração foi diminuindo ligeiramente ao longo do tempo devido às perdas por advecção. Os resultados obtidos com as determinações das concentrações de oxigénio e de dióxido de carbono revelaram uma insipiente actividade biológica a partir do décimo segundo dia, a qual não se manifestou na evolução das concentrações de xileno na fase gasosa nem se confirmou na quantificação da biomassa (Figura 3.48 (a) e (b) e Figura 3.50 (a));
- ✓ foi possível remediar o solo quer por bio-remediação (BXT_X) quer por bio-ventilação (BVXT_X); a grande diferença reside no tempo necessário à remediação, sendo o tempo necessário para atingir o nível residual de contaminante de catorze dias, no ensaio de bio-ventilação e de dezassete dias, no ensaio de bio-remediação. As eficiências finais obtidas foram elevadas e iguais, 99,6 % (Figura 3.50 (b));
- ✓ a respirometria respondeu sem atraso significativo e retratou adequadamente a bio-degradação.

A análise dos resultados obtidos nos ensaios em xisto contaminado com 200 mg kg⁻¹ de BTEoX (BVbXT_BTEoX, BbXT_BTEoX, BVXT_BTEoX e BXT_BTEoX), Figuras 3.49 e 3.50, permitiu verificar que:

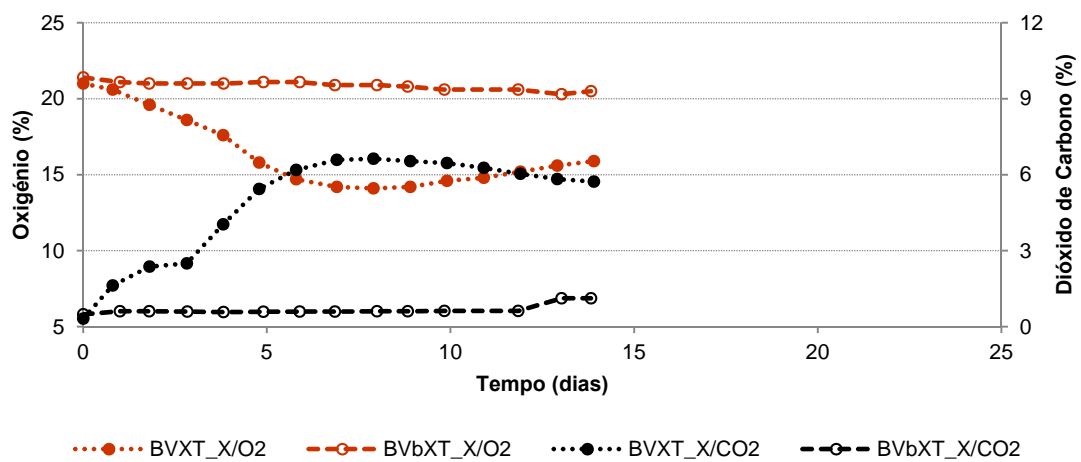
- ✓ no ensaio de bio-remediação não inoculado em solo estéril (BbXT_BTEoX), após estabelecimento do equilíbrio no sistema, as concentrações na fase gasosa mantiveram-se aproximadamente constantes (Figura 3.49 (a));
- ✓ no ensaio de bio-ventilação não inoculado em solo estéril (BVbXT_BTEoX) a concentração foi, como nos outros casos, diminuindo ligeiramente ao longo do tempo devido às perdas por advecção até ao oitavo dia, a partir dessa altura e até ao décimo segundo dia verificou-se crescimento na remoção de contaminante na fase gasosa, com posterior estabilização. A evolução das concentrações de oxigénio e de dióxido de carbono apontam para possível ocorrência de actividade biológica, mas a quantificação da biomassa não confirmara este perfil (Figura 3.49 (a) e (b) e 3.50);
- ✓ para o nível de contaminação estudado, foi possível remediar o solo quer por bio-remediação (BXT_BTEoX) quer por bio-ventilação (BVXT_BTEoX), sendo grande a diferença nos tempos de remediação: catorze dias, no ensaio de bio-ventilação e vinte

e um dias, no ensaio de bio-remediação. As eficiências finais obtidas foram elevadas e idênticas, 99,9 e 99,8 %, respectivamente (Figura 50 (b));

- ✓ nestes ensaios a respirometria respondeu, novamente, sem atraso significativo e retratou adequadamente a bio-degradação.

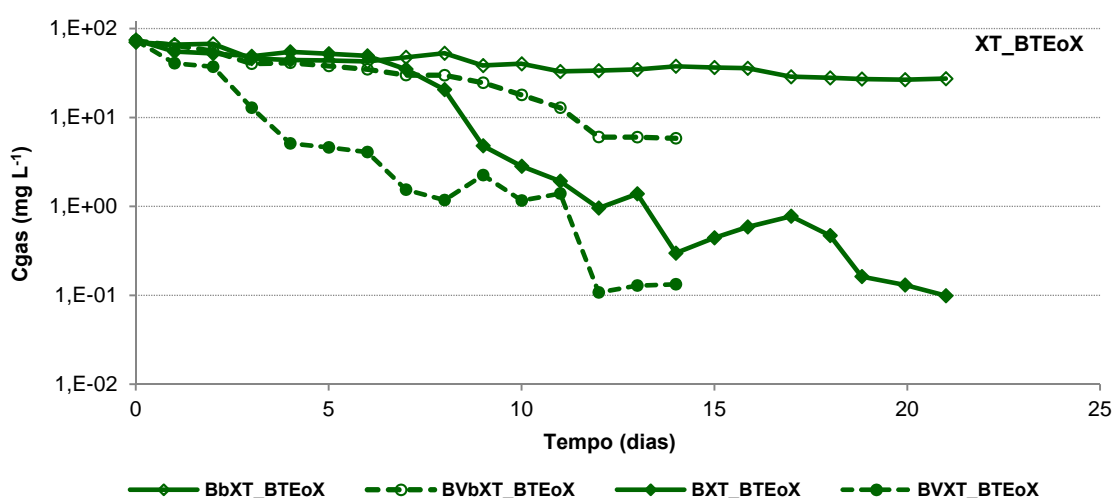


(a)

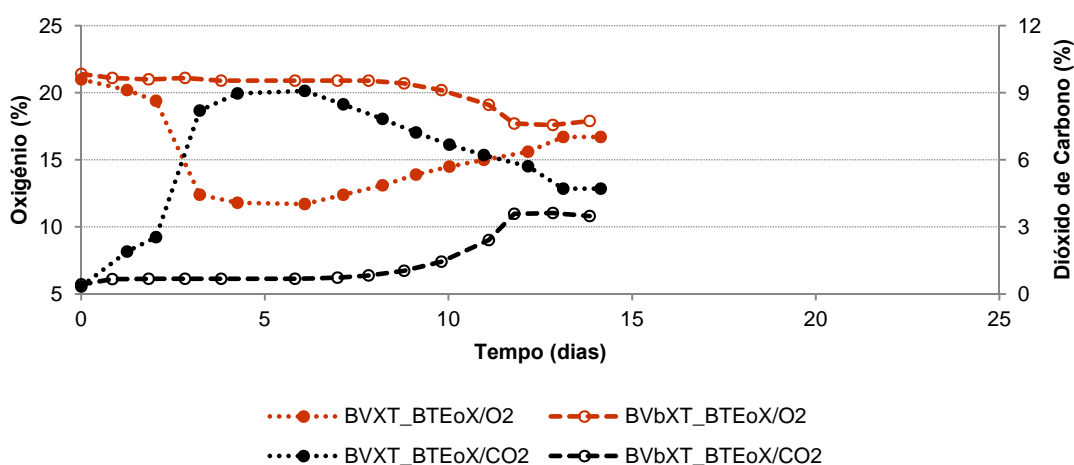


(b)

Figura 3.48 – Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em xisto (XT) contaminado com $200\ mg\ kg^{-1}$ de xileno (X). (a) Evolução da concentração de xileno na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O_2 e CO_2 na fase gasosa.



(a)



(b)

Figura 3.49 – Ensaios de bio-ventilação e de bio-remediação realizados em xisto (XT) contaminado com $200\ mg\ kg^{-1}$ da mistura BTEoX. (a) Evolução da concentração de BTEoX na fase gasosa; (b) Evolução da concentração de O_2 e CO_2 na fase gasosa.

Os resultados evidenciaram que, no final dos ensaios, a biomassa desenvolvida nos ensaios de bio-ventilação inoculados foi superior à dos ensaios de bio-remediação inoculados, em todos os contaminantes (Figura 3.50 (a)). Nos ensaios não inoculados a biomassa no final dos ensaios foi, como seria de esperar, muito baixa.

As eficiências e os tempos de remediação para o conjunto de ensaios inoculados de bio-remediação e de bio-ventilação realizados em xisto (Figura 3.50 (b)) foram sempre muito elevadas (99,6 a 99,9 %) e os tempos de remediação quase sempre curtos, variando entre seis e catorze dias, nos ensaios de bio-ventilação e entre nove e vinte e um dias, nos ensaios de bio-remediação.

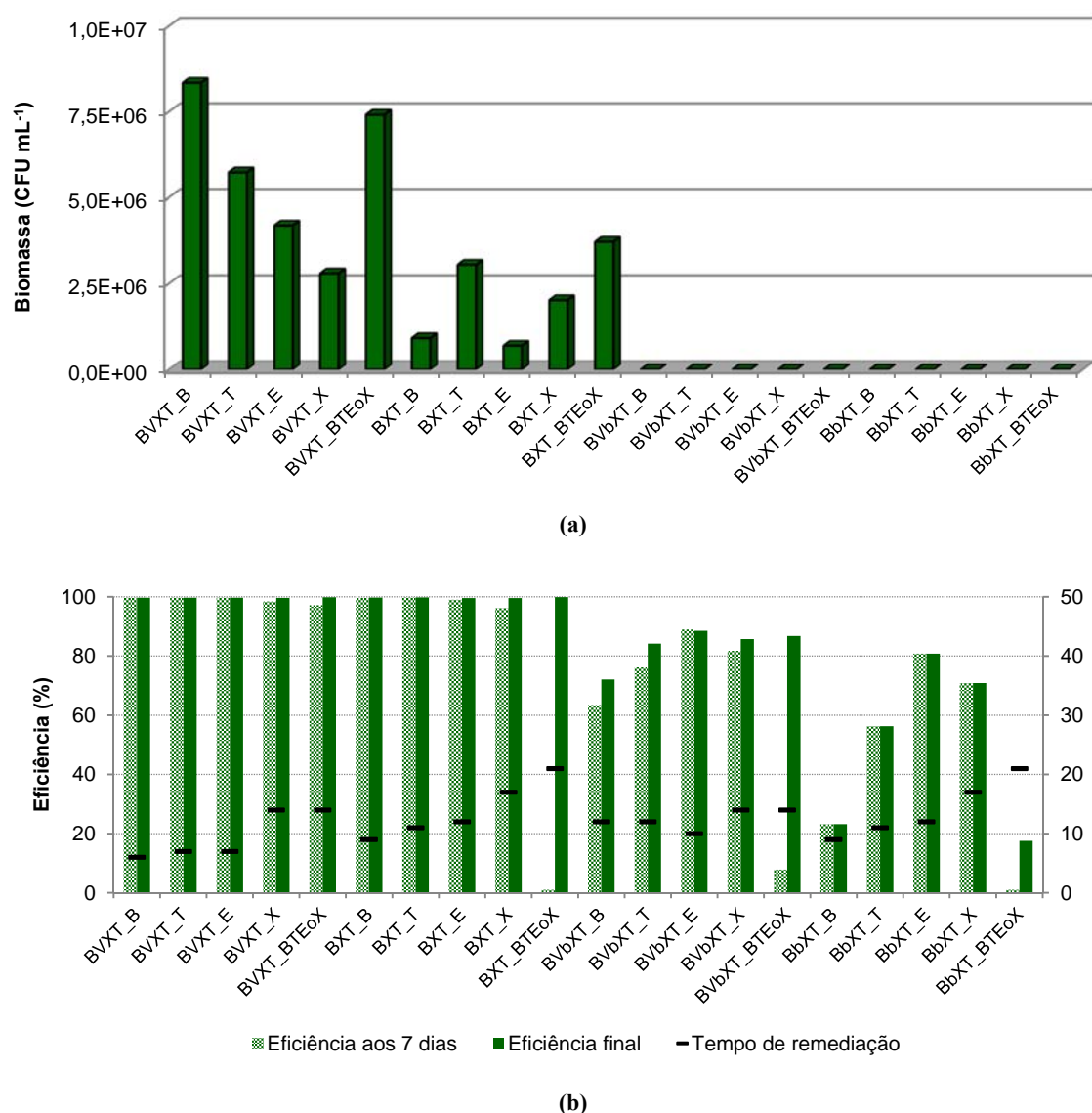


Figura 3.50 – Ensaios de remediação realizados em xisto (BXT, BVXT, BbXT e BVbXT) contaminado com benzeno (B) tolueno (T), etilbenzeno (E), xileno (X) e BTEoX. (a) Quantificação da biomassa no final dos ensaios; (b) Eficiência teórica determinada após 7 dias de ensaio e no final dos ensaios com respectivo tempo de remediação.

Com base nos valores experimentais da evolução da concentração de contaminante na fase gasosa, foram calculadas as cinéticas das reacções segundo (Ridder, 2010), os resultados obtidos são sintetizados na Tabela 3.12, na qual se indica a ordem da reacção (α), a constante cinética (K_c) e o coeficiente de determinação (R^2). Os resultados obtidos permitiram verificar que a ordem da reacção estava, na maioria dos casos, compreendida entre um e dois, sendo globalmente mais elevada do que nos outros dois solos (CL e SR). Verifica-se uma tendência geral da ordem da reacção decrescer com a diminuição da pressão de vapor do contaminante e, para o mesmo contaminante, é quase sempre maior no ensaio de bio-ventilação, sendo de

novo o xileno a excepção. A constante cinética diminui com a diminuição da pressão de vapor do contaminante e, para o mesmo contaminante, é quase sempre maior no ensaio de bio-ventilação.

Tabela 3.12 – Avaliação da cinética dos ensaios inoculados realizados em xisto.

	Ensaio	Ordem	K_c ($\text{mg}^{a-1} \text{L}^{1-a} \text{h}^{-1}$)	R^2
Bio-remediação	BXT_B	1,3	$2,71 \times 10^{-2}$	0,963
	BXT_T	1,1	$2,75 \times 10^{-2}$	0,911
	BXT_E	1,2	$1,58 \times 10^{-2}$	0,988
	BXT_X	1,0	$1,25 \times 10^{-2}$	0,976
	BXT_BTEoX	1,1	$1,42 \times 10^{-2}$	0,929
Bio-ventilação	BVXT_B	1,9	$3,38 \times 10^{-2}$	0,920
	BVXT_T	1,1	$3,88 \times 10^{-2}$	0,886
	BVXT_E	1,6	$2,67 \times 10^{-2}$	0,938
	BVXT_X	1,5	$1,04 \times 10^{-2}$	0,966
	BVXT_BTEoX	0,9	$1,92 \times 10^{-2}$	0,914

3.5.1.4. ANÁLISE GLOBAL

A análise global dos resultados obtidos permitiu constatar que, em todos os casos estudados, foi possível remediar os solos contaminados quer por bio-remediação quer por bio-ventilação, o que mais uma vez comprova a adequação do consórcio microbiano utilizado e das técnicas de remediação escolhidas.

Na maioria das situações, a respirometria respondeu sem atraso significativo e retratou adequadamente a bio-degradação, o que abre novas perspectivas para a utilização deste tipo de monitorização no controlo da evolução dos processos de bio-degradação aeróbia.

Em alguns ensaios, foram assinalados pela respirometria períodos com actividade biológica que não corresponderam a acréscimos na diminuição da concentração de contaminante na fase gasosa, nem ao aumento da população microbiana aeróbia. Esta suposta actividade biológica pode ter sido realizada por microrganismos que entraram no sistema durante a ventilação, mas não apresentam capacidade de biodegradar os contaminantes. O facto de estes períodos de possível actividade biológica serem normalmente curtos e o facto de a quantificação da biomassa no final dos ensaios não confirmar a existência de microrganismos, pode indicar

que, se existiram, os microrganismos em causa não sobreviveram na presença dos contaminantes. Estas supostas anomalias na respirometria podem também ter resultado de fenómenos de arrasto nas tubagens quando se realizou a monitorização sequencial de diferentes tipos de ensaio (inoculados e não inoculados).

Nos ensaios não inoculados em que ocorreu actividade biológica com correspondente diminuição da concentração de contaminante, verificou-se que o início desta actividade foi tardia, relativamente ao início da actividade no correspondente ensaio inoculado. Este facto sugeriu a presença no sistema de microrganismos com capacidade de degradação, que poderão ser microrganismos autóctones dos solos em estudo, que não foram eficazmente eliminados durante a esterilização ou resultantes da contaminação do reactor por microrganismos do consórcio utilizados em ensaios inoculados realizados anteriormente, que conseguiram resistir à lavagem e desinfecção do reactor, que não pode ser esterilizado em autoclave.

Analisando as eficiências finais obtidas nos ensaios inoculados, verificou-se que são sempre muito elevadas, tanto na bio-remediação como na bio-ventilação. Em 87 % dos casos atingiram valores superiores a 99 %, em 11 % dos casos estão compreendidas entre 98 e 99 % e em 2 % dos casos foi de 80 %.

Relativamente ao tempo de remediação necessário para atingir a concentração residual estabelecida ($0,5 \text{ mg L}^{-1}$ na fase gasosa), verificou-se que em 76 % dos casos dos ensaios de bio-remediação o tempo foi superior ao dos ensaios de bio-ventilação; igual em 17 % dos casos e inferior nos restantes 7 %. As situações de igualdade de tempo ocorreram em calcário contaminado com tolueno, em calcário contaminado com etilbenzeno e em granito contaminado com tolueno. Só no estudo do calcário contaminado com BTEoX é que o tempo de remediação no ensaio de bio-remediação foi inferior ao do ensaio de bio-ventilação.

Analisando os tempos de remediação requeridos pelos diferentes contaminantes no mesmo solo, verificou-se que o xileno foi o contaminante que em todos os casos necessitou de maior tempo de remediação, por vezes em *ex aequo* com o benzeno. No calcário e no granito, o tolueno e o etilbenzeno foram os contaminantes que requereram menor tempo de remediação, quase sempre em *ex aequo*, enquanto no xisto foi sempre o benzeno que apresentou menor tempo de remediação.

Comparando os resultados nos três solos, no mesmo tipo de ensaio inoculado e com o mesmo contaminante, verificou-se que o granito apresentou o maior tempo de remediação em 90 % dos casos, o xisto apresentou o menor tempo de remediação em 60 % dos casos e o calcário apresentou o menor tempo de remediação em 40 % dos casos e o maior em 10 % dos casos. Em média, o tempo de remediação nos ensaios inoculados foi de 12,1 dias no calcário, 26,4 dias no granito e 11,8 dias no xisto; ou seja, o tempo médio de remediação do calcário e do xisto são semelhantes e muito inferiores ao que se verificou no granito. Estes resultados não evidenciaram uma correlação directa com a respectiva fracção granulométrica argilosa, uma

vez que o calcário e o xisto têm fracções argilosas muito distintas, 15 % e 3 % respectivamente, e apresentaram tempos de remediação semelhantes, enquanto o granito com uma fracção argilosa de 7 % apresentou tempos de remediação muito superiores. O teor em matéria orgânica é muito baixo e semelhante em todos os solos, pelo que não poderá ser considerado determinante nesta diferença. A composição mineralógica, nomeadamente o conteúdo em minerais de argila, surge como o parâmetro potencialmente responsável pelos diferentes tempos de remediação, uma vez que o solo granítico apresenta na sua composição mineralógica elevada percentagem de caulinite, o que não acontece nos outros dois solos.

Os dados relativos à biomassa quantificada no final dos ensaios revelaram que, nos ensaios de bio-ventilação inoculados, a biomassa foi superior à desenvolvida nos ensaios de bio-remediação inoculados, em todos os solos e todos os contaminantes. O solo residual granítico foi o solo que apresentou biomassa menor, o que poderá estar relacionado com as características minerais do solo e com a maior duração dos ensaios neste tipo de solo. Nos ensaios não inoculados, a biomassa quantificada apontou para valores residuais o que estava de acordo com o expectável, constituindo excepção o ensaio não inoculado de bio-ventilação realizado em calcário contaminado com benzeno, no qual a biomassa quantificada apontou para valores pouco comuns neste tipo de ensaios, mas que foi concordante com a actividade biológica detectada pela respirometria e com o aumento da remoção de contaminante na fase gasosa no final do ensaio.

Os resultados obtidos não foram claros no que respeita à influência das diferentes características dos solos no processo de remediação. O solo residual granítico foi o que apresentou maior dificuldade na reabilitação, tendo tempos de remediação muito mais elevados do que o calcário e do que o xisto. Este resultado foi aparentemente contraditório com o que se obteve no estudo da distribuição dos contaminantes pelas diferentes fases dos solos. Neste estudo, o calcário apresentou-se como o solo com maior capacidade de retenção, estando o granito em segunda posição. Esta aparente contradição deverá estar relacionada com a natureza mineralógica dos constituintes dos solos; o calcário apresentava fracção argilosa mais abundante que o granito, mas o granito apresentava, na sua composição mineralógica, uma enorme predominância de minerais de argila. Os resultados sugeriram que a fracção argilosa era mais condicionante da capacidade de retenção dos contaminantes em situações de equilíbrio enquanto a presença de minerais de argila era mais condicionante nos processos de bio-remediação. Como referido no Capítulo 1, a presença de minerais de argila aumenta a capacidade de permuta catiónica e condiciona a disponibilidade de água e de nutrientes dissolvidos, o que poderá ser um dos factores chave na bio-reabilitação.

3.5.2. APLICAÇÃO DE MODELOS BASEADOS NO CÁLCULO DAS CAPACIDADES COMPARTIMENTAIS DOS COMPARTIMENTOS AMBIENTAIS

Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos na aplicação de modelos conceptuais baseados no cálculo das capacidades compartimentais e comparados os resultados neles obtidos com os resultados alcançados experimentalmente. Os resultados estão organizados por tipo de ensaio: ensaios de bio-remediação inoculados (B), ensaios de bio-remediação não inoculados (Bb), ensaios de bio-ventilação inoculados (BV) e ensaios de bio-ventilação não inoculados (BVb); e dentro de cada tipo de ensaio por tipo de solo (calcário, CL; granito, SR e xisto, XT) e dentro de cada tipo de solo por contaminante (benzeno, B; tolueno, T; etilbenzeno, E; xileno, X e BTEoX).

3.5.2.1. ENSAIOS DE BIO-REMEDIAÇÃO NÃO INOCULADOS

Os ensaios de bio-remediação não inoculados realizaram-se em sistema fechado, em equilíbrio e sem ocorrência de reacções, pelo que o modelo utilizado na simulação foi um modelo de Nível 1 (Mackay, 2001). Neste modelo foi considerada a geometria do sistema utilizado nos ensaios laboratoriais, os parâmetros intrínsecos dos solos estudados e as propriedades dos contaminantes utilizados; com base nestes dados, foram calculadas as capacidades compartimentais de cada compartimento, o valor da fugacidade no equilíbrio e finalmente a concentração de contaminante, no equilíbrio, em cada compartimento. Os cálculos efectuados são apresentados no Anexo VII.

Na Figura 3.51 são apresentadas, para cada contaminante estudado em calcário, as concentrações na fase gasosa, no equilíbrio, obtidas experimentalmente (Cgas_Lida) e por aplicação do modelo matemático (Cgas_Calculada), apresenta-se ainda o erro relativo entre estes dois valores. Os contaminantes foram estudados individualmente e na mistura, pelo que na figura aparecem B, T, E e X, correspondendo ao estudo dos contaminantes individualmente, e BTEoX, “B”, “T”, “E” e “oX”, correspondendo ao estudo do comportamento da mistura e dos vários contaminantes, quando utilizados na mistura.

A análise dos resultados permitiu verificar que os valores teóricos (calculados) foram bastante próximos dos reais (experimentais). Os resultados obtidos para o estudo individual dos contaminantes conduziram a erros relativos baixos, no máximo 0,11. O estudo da mistura e dos contaminantes na mistura apresentou maiores desvios individuais (0,15 a 0,33), embora na mistura o erro relativo seja de 0,13. Com base nesta informação pôde considerar-se que o modelo utilizado era adequado à simulação deste tipo de ensaios em calcário, para todos os contaminantes testados.

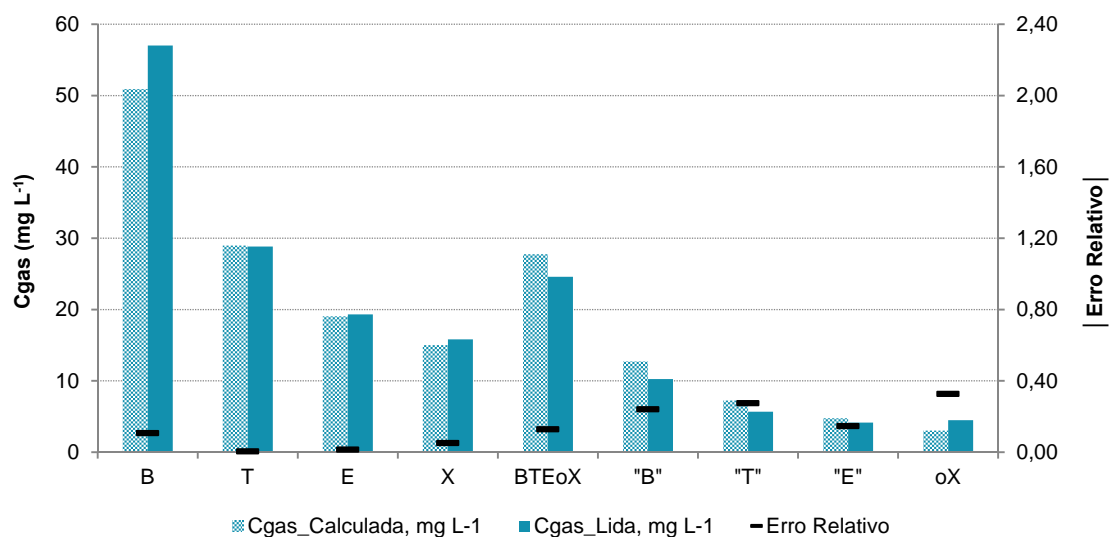


Figura 3.51 – Ensaio de bio-remediação não inoculados realizados em calcário. Comparação entre as concentrações finais de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente e as calculadas com base nas capacidades compartimentais e respectivo erro relativo.

Na Figura 3.52 são apresentadas as concentrações na fase gasosa, no equilíbrio, de cada contaminante estudado em solo granítico, obtidas experimentalmente (C_{gas_Lida}) e por aplicação do modelo matemático ($C_{gas_Calculada}$), apresenta-se ainda o erro relativo entre estes dois valores. Também neste caso os contaminantes foram estudados individualmente (B, T, E e X) e na mistura (BTEoX, "B", "T", "E" e "oX"),

A análise dos resultados permitiu verificar que os valores teóricos (calculados) foram muito diferentes dos reais (experimentais) para o ensaio do benzeno estudado individualmente (B), da mistura BTEoX, do etilbenzeno estudado na mistura ("E") e do o-xileno estudado na mistura ("oX"). Nestes casos, os erros relativos atingiram valores elevados, com particular destaque para o do benzeno (2,2). Nos restantes casos, verificou-se grande proximidade entre os valores teóricos (calculados) e os valores reais (experimentais), com erros relativos baixos ($< 0,2$).

A evolução ao longo do tempo das concentrações na fase gasosa do ensaio BbSR_B (Figura 3.39 (a)) permitiu verificar que a concentração no equilíbrio, calculada aplicando o modelo, ocorreu experimentalmente ao fim de catorze dias de ensaio, observou-se ainda que neste ensaio houve uma lenta mas continua diminuição da concentração de benzeno na fase gasosa até ao final do ensaio (42 dias), não se verificando estabilização. Num sistema que teoricamente é fechado e sem sumidouros, este comportamento só pode ser explicado pela ocorrência de uma anomalia no ensaio experimental, que poderá ter estado relacionada com a dificuldade em garantir total esterilização prévia do reactor.

Considerando que na maioria das situações estudadas se obtiveram valores calculados de concentração de contaminante na fase gasosa, no equilíbrio, próximos dos determinados

experimentalmente e admitindo a possibilidade de ocorrência de anomalias experimentais, pôde considerar-se que o modelo era adequado à simulação deste tipo de ensaios em granito.

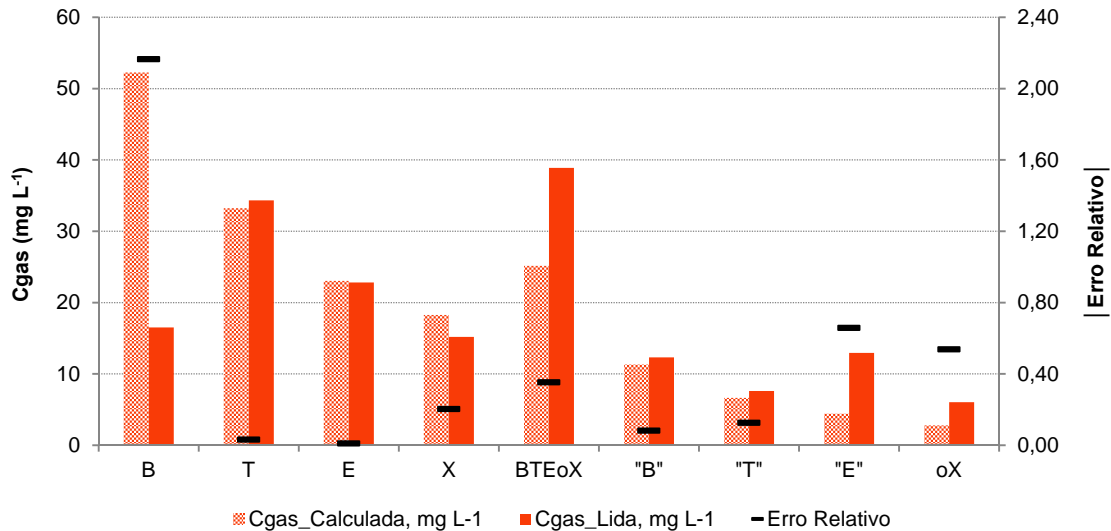


Figura 3.52 – Ensaios de bio-remediação não inoculados realizados em granito. Comparação entre as concentrações finais de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente e as calculadas com base nas capacidades compartimentais e respectivo erro relativo.

Na Figura 3.53 são apresentadas as concentrações na fase gasosa, no equilíbrio, para cada contaminante em xisto, obtidas experimentalmente (C_{gas_Lida}) e por aplicação do modelo matemático ($C_{gas_Calculada}$) e o respectivo erro relativo. Também neste caso os contaminantes foram estudados individualmente (B, T, E e X) e em mistura (BTEoX, "B", "T", "E" e "oX"), correspondendo ao estudo do comportamento da mistura e dos vários contaminantes, quando utilizados na mistura.

A análise dos resultados permitiu verificar que os valores teóricos (calculados) foram muito diferentes dos reais (experimentais) para a contaminação individual com etilbenzeno e xileno. Nos restantes casos, verificou-se grande proximidade entre os valores teóricos (calculados) e os valores reais (experimentais), com erros relativos baixos ($< 0,20$).

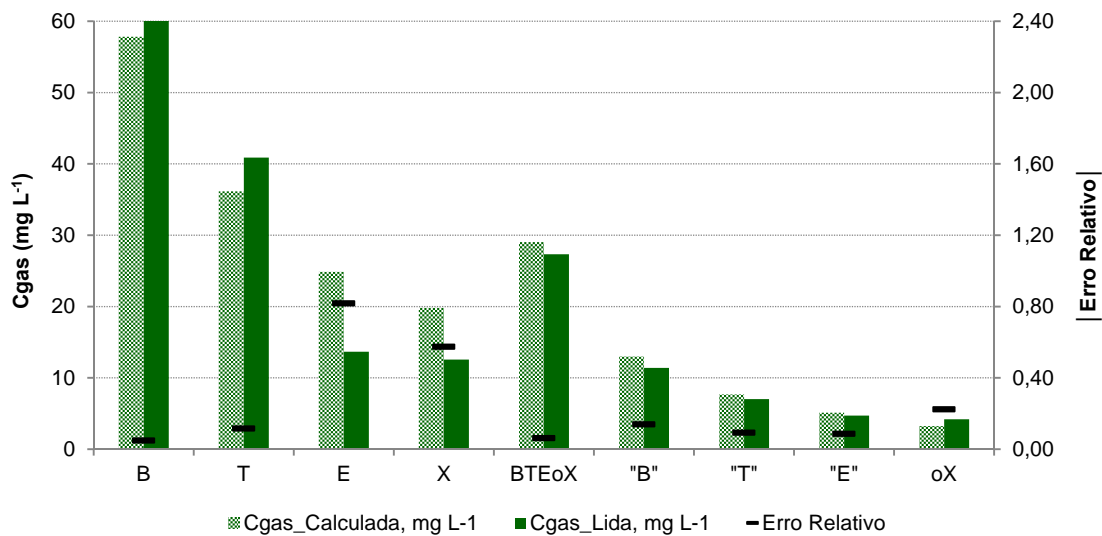


Figura 3.53 – Ensaio de bio-remediação não inoculados realizados em xisto. Comparação entre as concentrações finais de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente e as calculadas com base nas capacidades compartimentais e respectivo erro relativo.

A análise da evolução ao longo do tempo das concentrações na fase gasosa dos ensaios BbXT_E e BbXT_X (Figuras 3.47 e 3.48) permitiu detectar situações análogas às anteriormente descrita para o ensaio BBSR_B; são ensaios nos quais não se verificou uma efectiva estabilização da concentração na fase gasosa. Mais uma vez os resultados apontaram para uma concentração experimental muito inferior à teoricamente esperada. De novo se suspeitou da existência de anomalias nos ensaios.

Embora se tenham obtido desvios consideráveis em dois dos casos em estudo, considerando que na maioria das situações estudadas se obtiveram, a partir da aplicação do modelo, valores de concentração de contaminante na fase gasosa no equilíbrio próximos dos determinados experimentalmente e admitindo a possibilidade de ocorrência de anomalias experimentais, pôde considerar-se que, genericamente, o modelo se adequou bem ao processo em estudo.

3.5.2.2. ENSAIOS DE BIO-REMEDIAÇÃO INOCULADOS

Os ensaios de bio-remediação inoculados foram realizados em sistema fechado, com equilíbrio entre as fases, com sumidouros (aniquilação por bio-degradação) e em estado transiente, pelo que o modelo utilizado na simulação foi um modelo de Nível 2b (Mackay, 2001). Neste modelo foi considerada uma cinética de pseudo primeira ordem, a geometria do sistema utilizado nos ensaios laboratoriais, os parâmetros intrínsecos dos solos estudados e as propriedades dos contaminantes utilizados. Com base nestes dados foram calculadas as capacidades compartimentais de cada compartimento ambiental, o valor da fugacidade inicial no equilíbrio, a concentração inicial de contaminante em cada compartimento, o desaparecimento por bio-degradação, a constante cinética de processo, as fugacidades ao longo do tempo e finalmente as concentrações de contaminante, ao longo do tempo, na fase gasosa. Este exercício foi aplicado aos três solos e aos quatro contaminantes, estudados individualmente (B, T, E e X) ou em mistura (BTEoX). Os cálculos efectuados são apresentados no Anexo VII.

Nas Figuras 3.54 a 3.57 apresenta-se, para cada solo e cada contaminante, a evolução ao longo do tempo das concentrações na fase gasosa obtidos com a aplicação do modelo e comparam-se com os valores obtidos experimentalmente. Em cada ensaio, a comparação entre as curvas experimental e conceptual permitiu ainda estabelecer o período de estabilização. Na Tabela 3.13 é apresentada uma síntese dos resultados obtidos nos ajustes do modelo, indicando-se a duração do período inicial de estabilização, a constante cinética do processo e o erro relativo calculado para cada situação estudada.

Os resultados obtidos nos estudos realizados em calcário (Figura 3.54) conduziram a bons ajustes do modelo aos dados experimentais após o período de estabilização; o modelo simulou de forma adequada a evolução da concentração de contaminante na fase gasosa e apontou para valores da mesma ordem de grandeza dos obtidos experimentalmente.

Os resultados obtidos nos estudos realizados em granito (Figuras 3.55 e 3.56) conduziram, após o período de estabilização, a bons ajustes do modelo aos dados experimentais; o modelo simulou, em todos os casos, de forma adequada, a evolução da concentração de contaminante na fase gasosa e apontou para valores da mesma ordem de grandeza dos obtidos experimentalmente. Constituiu excepção o ensaio BSR_BTEoX que apresentou, até ao dia dezoito, evolução irregular dos valores experimentais o que dificultou o ajuste do modelo.

Os resultados obtidos nos estudos realizados em xisto (Figura 3.57) conduziram a bons ajustes do modelo aos dados experimentais, após o período de estabilização; o modelo simulou, em todos os casos, de forma adequada, a evolução da concentração de contaminante na fase gasosa e apontou para valores da mesma ordem de grandeza dos obtidos experimentalmente.

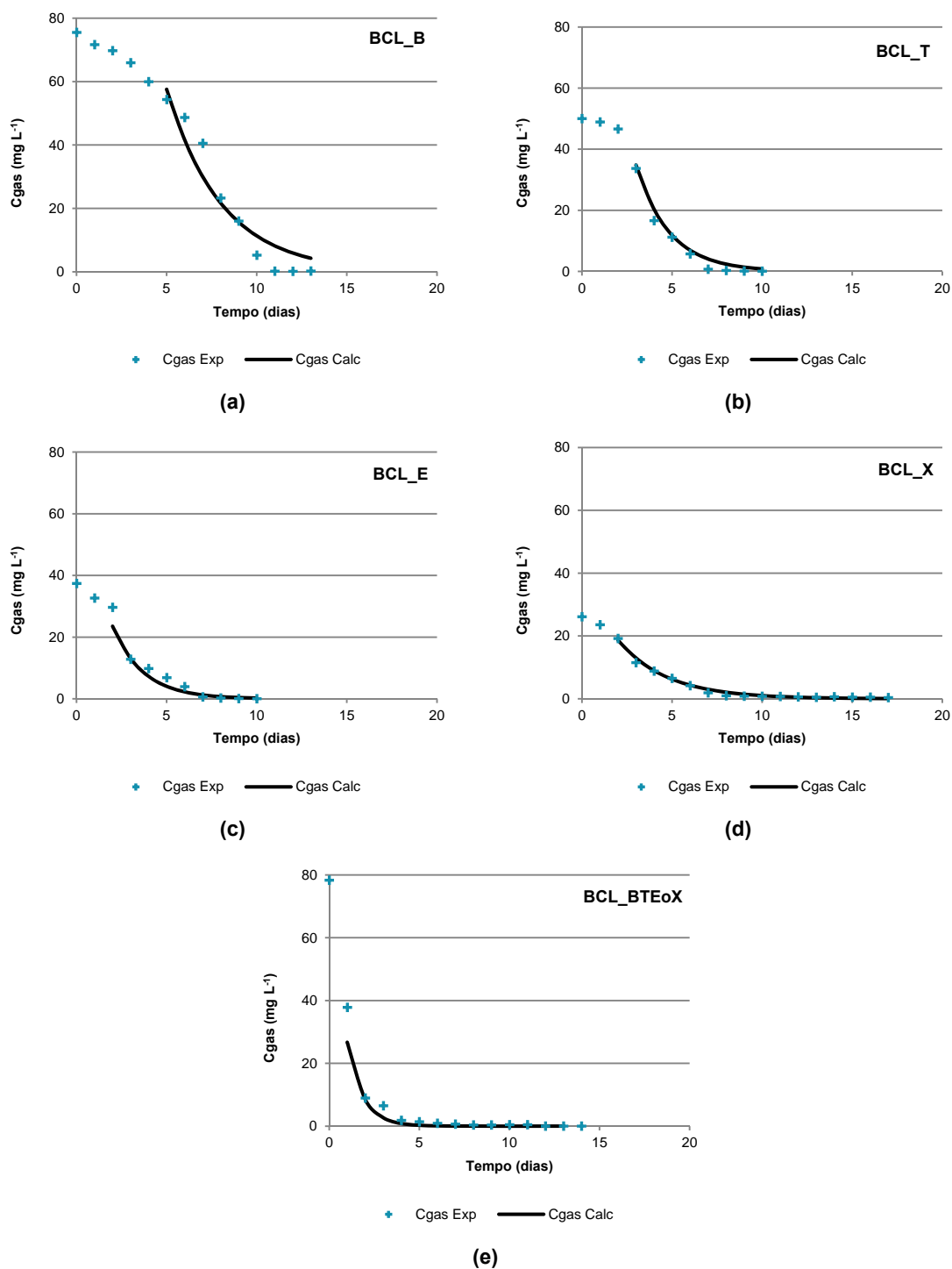


Figura 3.54 – Ensaio de bio-remediação realizados em calcário inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: (a) Benzeno; (b) Tolueno; (c) Etilbenzeno; (d) Xileno; (e) BTEoX.

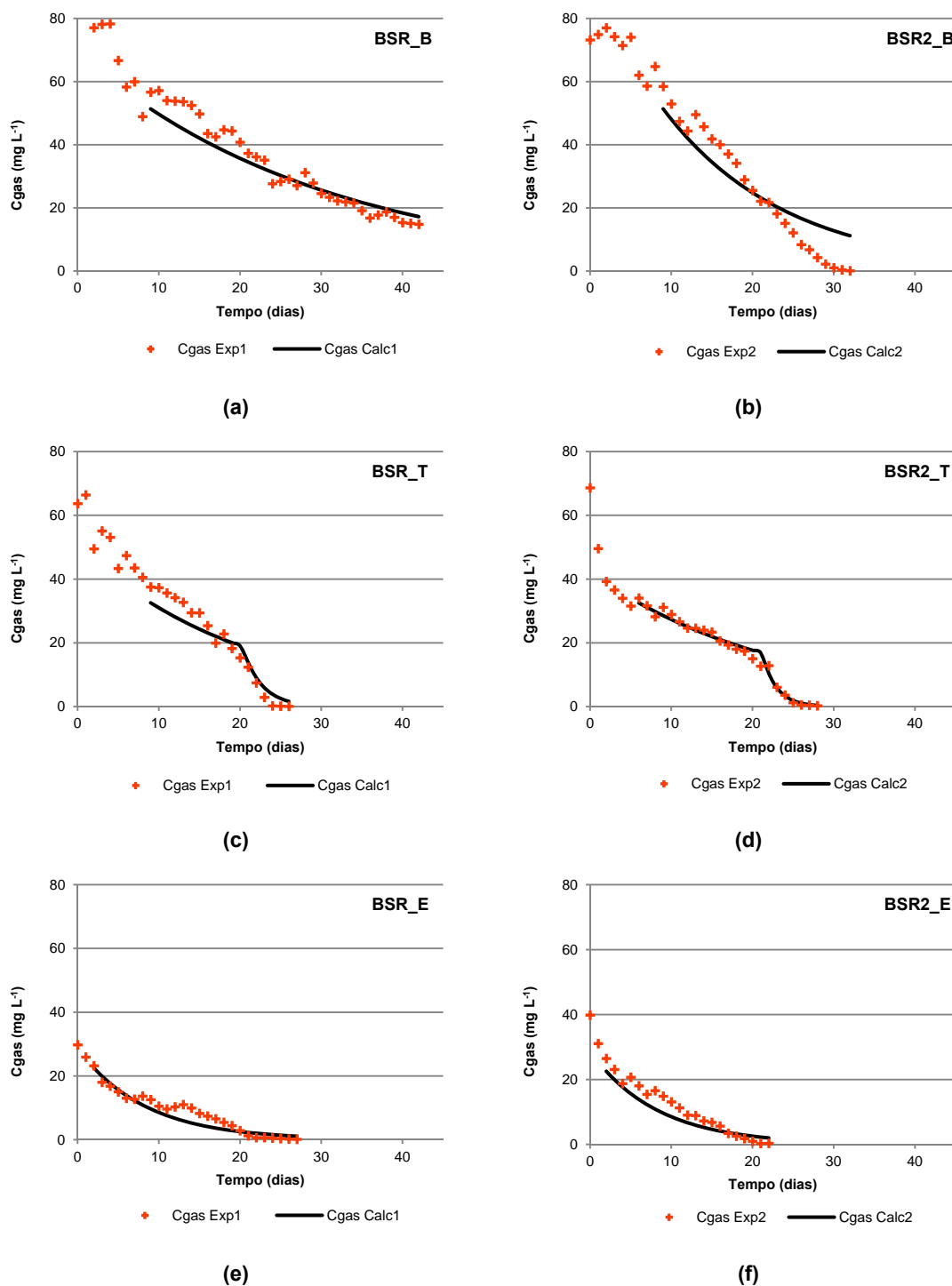


Figura 3.55 – Ensaio de bio-remediação realizados em granito inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: Benzeno, ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b); Tolueno, ensaio 1 (c) e ensaio 2 (d); Etilbenzeno, ensaio 1 (e) e ensaio 2 (f).

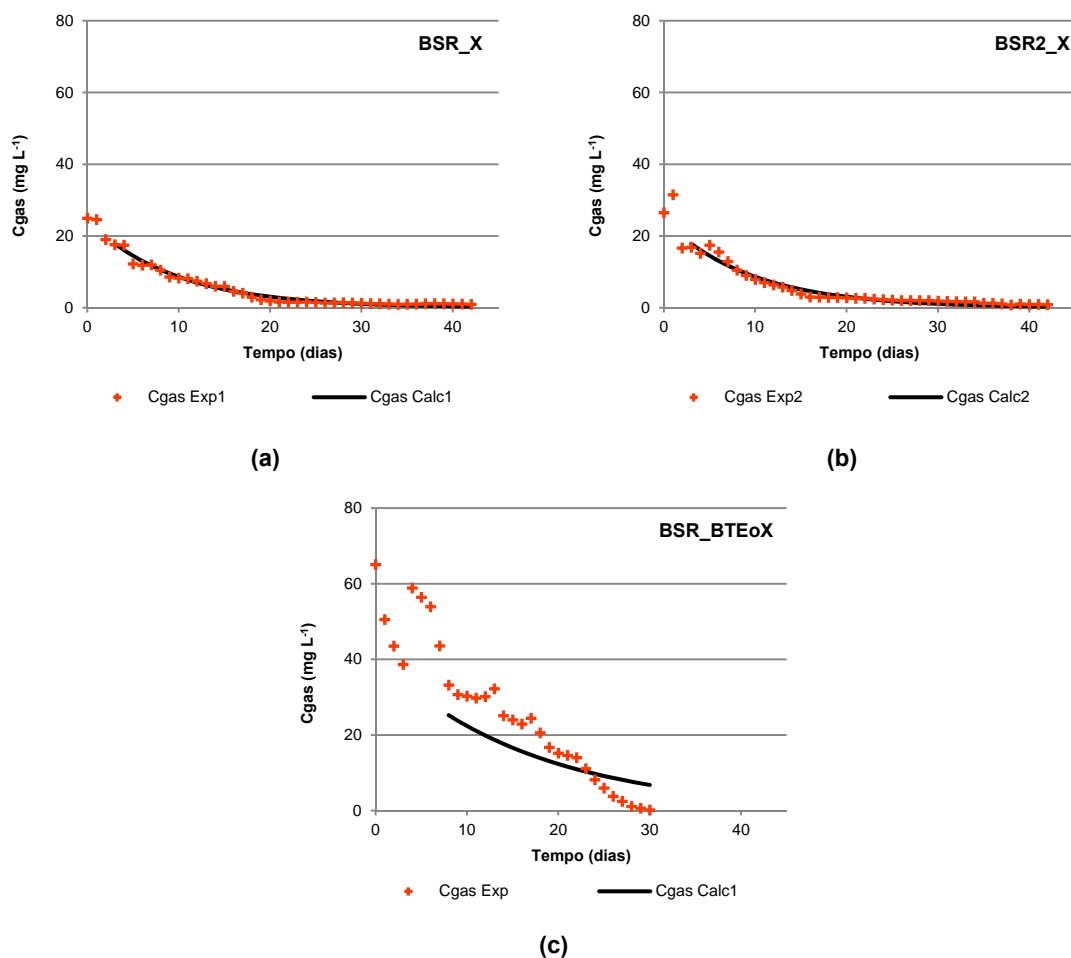


Figura 3.56 – Ensaio de bio-remediação realizados em granito inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: Xileno, ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b) e BTEoX (c).

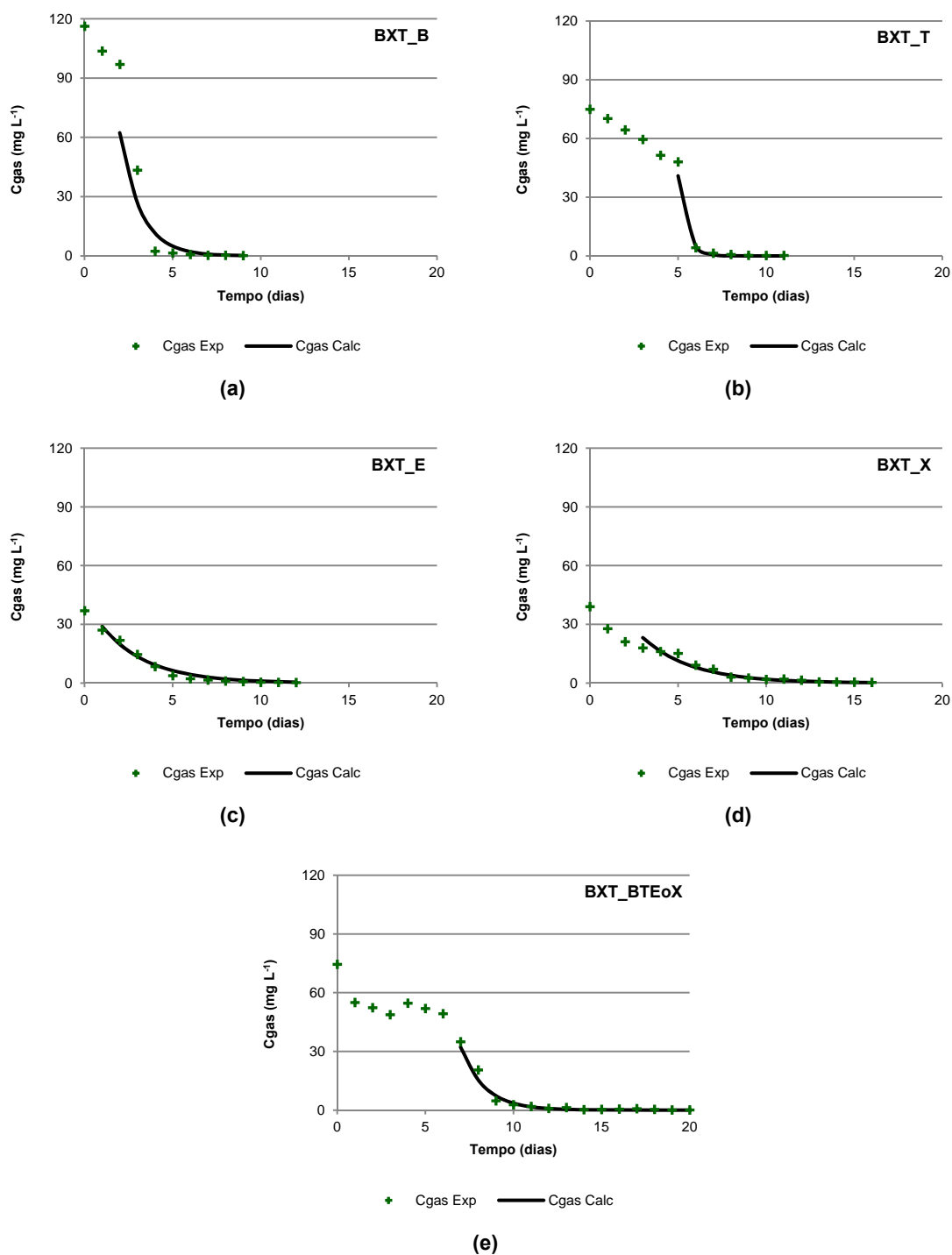


Figura 3.57 – Ensaio de bio-remediação realizados em xisto inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: (a) Benzeno; (b) Tolueno; (c) Etilbenzeno; (d) Xileno; (e) BTEoX.

A análise dos resultados apresentados nas Figuras 3.54 a 3.57 permitiu verificar, em todos os casos, um desfaseamento inicial que correspondeu ao período de estabilização nos ensaios

experimentais (t_i). Este período inicial variou com o tipo de solo e, dentro do mesmo solo, de contaminante para contaminante (Tabela 3.13). Nos ensaios realizados em granito estes períodos foram mais longos do que no caso do calcário e do xisto. Dentro do mesmo solo verificou-se que, de um modo geral, não houve uma tendência clara; notou-se, no entanto, propensão para o período de estabilização diminuir com a diminuição da pressão de vapor do contaminante. Nos casos do granito com benzeno, com tolueno e com BTEoX este período inicial assumiu valores muito elevados e díspares relativamente às restantes situações. Os valores das constantes cinéticas (Tabela 3.13) corroboram a análise anteriormente apresentada (3.5.1), indicando que a bio-remediação foi mais lenta no solo granítico do que no calcário e no xisto.

Tabela 3.13 – Síntese dos resultados obtidos nos ajustes dos modelos baseados na capacidade compartimental dos compartimentos ambientais aplicados aos ensaios de bio-remediação inoculados.

	Ensaio	t_i (dias)	Constante Cinética (h^{-1})	Erro Relativo
Calcário	BCL_B	5	$1,4 \times 10^{-2}$	0,25
	BCL_T	3	$2,2 \times 10^{-2}$	0,21
	BCL_E	2	$2,5 \times 10^{-2}$	0,28
	BCL_X	2	$1,5 \times 10^{-2}$	0,13
	BCL_BTEoX	1	$4,8 \times 10^{-2}$	0,35
Granito	BSR_B	9	$1,4 \times 10^{-3}$	0,11
	BSR2_B	9	$2,8 \times 10^{-3}$	0,25
	BSR_T	9	$2,0 \times 10^{-3}$	0,18
	BSR2_T	6	$1,8 \times 10^{-2}$	0,07
			$2,4 \times 10^{-2}$	
	BSR_E	3	$5,1 \times 10^{-3}$	0,24
	BSR2_E	3	$5,1 \times 10^{-3}$	0,27
	BSR_X	3	$4,3 \times 10^{-3}$	0,13
	BSR2_X	3	$4,3 \times 10^{-3}$	0,16
	BSR_BTEoX	8	$2,5 \times 10^{-3}$	0,36
Xisto	BXT_B	2	$3,5 \times 10^{-2}$	0,45
	BXT_T	5	$8,6 \times 10^{-2}$	0,18
	BXT_E	1	$1,6 \times 10^{-2}$	0,18
	BXT_X	3	$1,5 \times 10^{-2}$	0,19
	BXT_BTEoX	7	$3,1 \times 10^{-2}$	0,22

t_i – tempo de estabilização

3.5.2.3. ENSAIOS DE BIO-VENTILAÇÃO NÃO INOCULADOS

Os ensaios de bio-ventilação não inoculados realizaram-se num sistema em equilíbrio com sumidouros e em estado transiente, pelo que o modelo utilizado na simulação foi um modelo de Nível 2b (Mackay, 2001). Neste modelo foi considerada uma cinética de pseudo primeira ordem, a geometria do sistema utilizado nos ensaios laboratoriais, os parâmetros intrínsecos dos solos estudados e as propriedades dos contaminantes utilizados. Com base nestes dados foram calculados as capacidades compartimentais de cada compartimento ambiental, o valor da fugacidade inicial no equilíbrio, a concentração inicial de contaminante em cada compartimento, o desaparecimento por reacção e por advecção, a constante cinética do processo, as fugacidades ao longo do tempo e finalmente as concentração de contaminante na fase gasosa ao longo do tempo. Este exercício foi aplicado aos três solos e aos quatro contaminantes (B, T, E e X), estudados individualmente ou em mistura (BTEoX). Os cálculos efectuados são apresentados no Anexo VII. Nas Figuras 3.58 a 3.60 apresentam-se os resultados obtidos e faz-se a comparação com os valores experimentais. A comparação entre as curvas experimental e conceptual, permitiu ainda estabelecer o período de estabilização para cada ensaio. Na Tabela 3.14 é apresentada uma síntese dos resultados obtidos nos ajustes do modelo, indicando-se a duração do período inicial de estabilização, a constante cinética do processo e o erro relativo calculado para cada situação estudada.

Os resultados obtidos nos estudos realizados nos três solos conduziram, após o período de estabilização, a bons ajustes do modelo aos dados experimentais; o modelo simulou de forma adequada a evolução da concentração de contaminante na fase gasosa e apontou para valores semelhantes aos obtidos experimentalmente. Notaram-se, em algumas situações, curvas teóricas com pior ajuste mas ainda passíveis de serem considerados adequados.

Nestes ensaios de bioventilação não inoculados, foi testado um outro modelo conceptual em que se consideravam apenas as perdas por advecção; este modelo revelou-se muito pouco adequado, o que apontou para a ocorrência de outros processos de remoção de contaminante que podem estar relacionados com fenómenos de degradação biótica ou abiótica.

Os resultados obtidos (Figuras 3.58 a 3.60 e Tabela 3.14) revelaram, em todos os casos, um desfasamento inicial que correspondeu ao período de estabilização nos ensaios experimentais (t_i). Este período foi curto (1 a 3 dias) e semelhante no calcário e no xisto, sendo superior (3 a 6 dias) no granito. Os valores das constantes cinéticas (Tabela 3.14) foram todos da mesma ordem de grandeza (10^{-3} h^{-1}), apontando, no entanto, uma velocidade de remoção ligeiramente mais rápida no xisto e no calcário do que no granito.

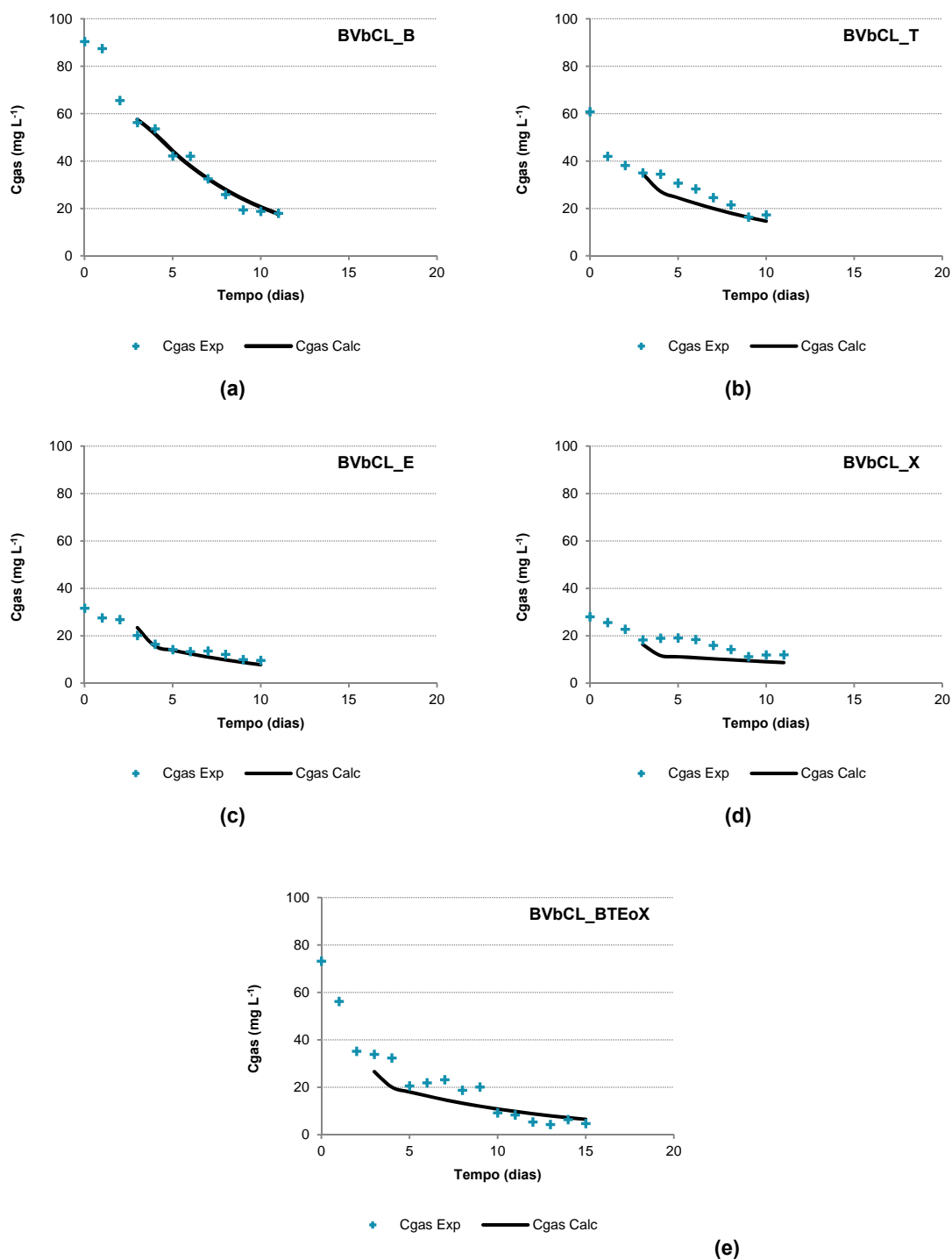


Figura 3.58 – Ensaio de bio-ventilação realizados em calcário não inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: (a) Benzeno; (b) Tolueno; (c) Etilbenzeno; (d) Xileno; (e) BTEoX.

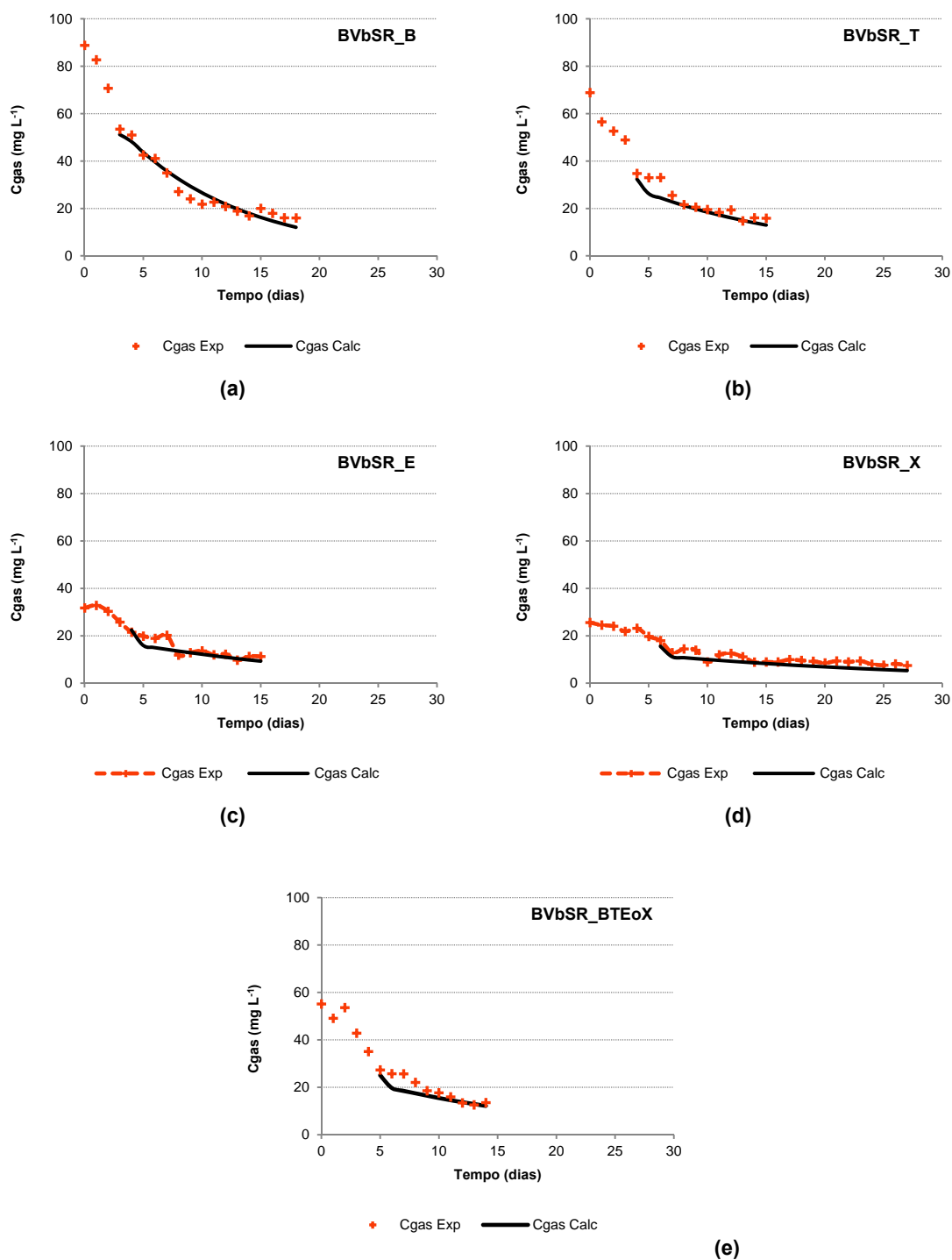


Figura 3.59 – Ensaio de bio-ventilação realizados em granito não inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: (a) Benzeno; (b) Tolueno; (c) Etilbenzeno; (d) Xileno; (e) BTEoX.

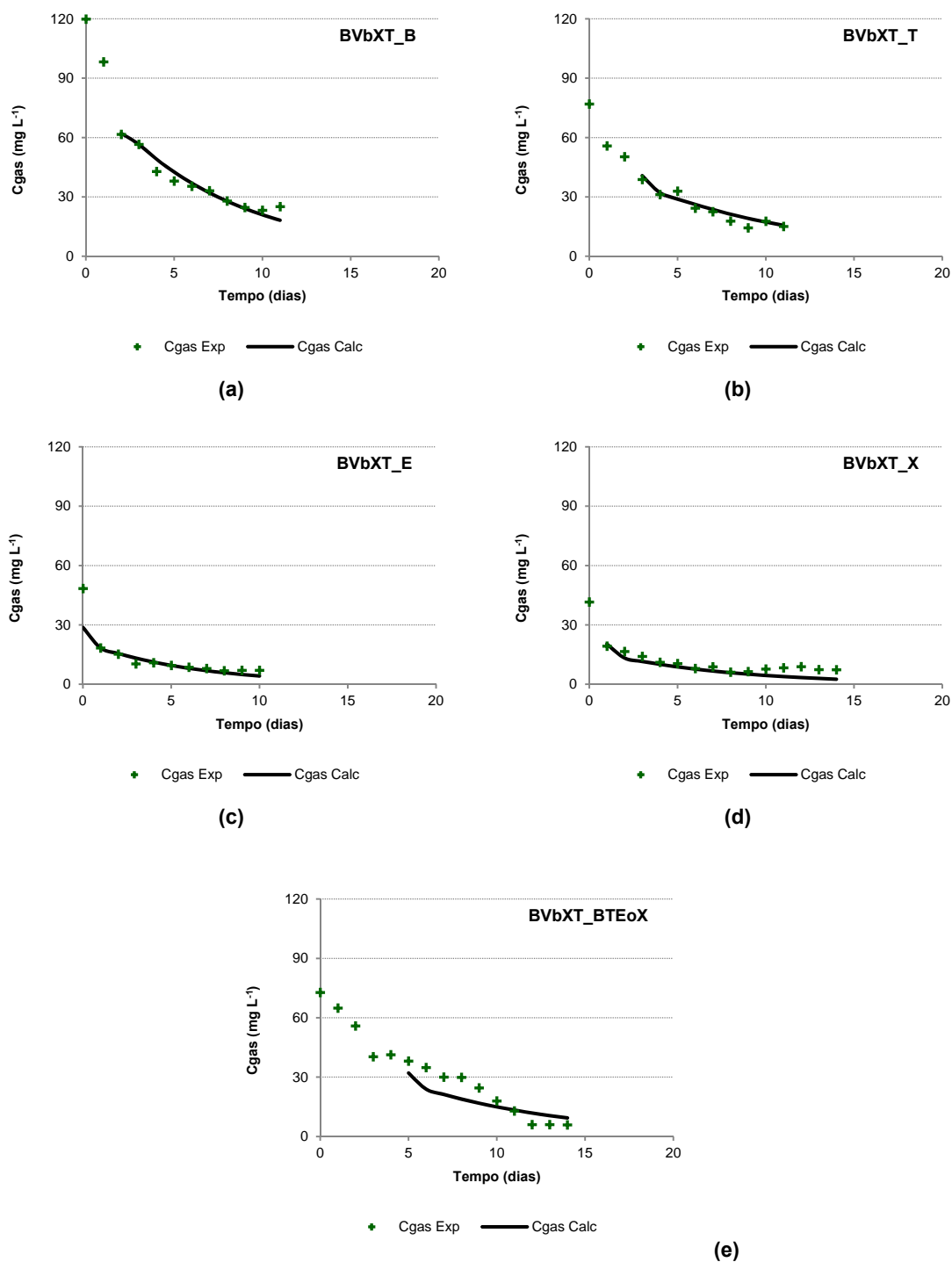


Figura 3.60 – Ensaio de bio-ventilação realizados em xisto não inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: (a) Benzeno; (b) Tolueno; (c) Etilbenzeno; (d) Xileno; (e) BTEoX.

Tabela 3.14 – Síntese dos resultados obtidos nos ajustes dos modelos baseados na capacidade compartimental dos compartimentos ambientais aplicados aos ensaios de bio-ventilação não inoculados

	Ensaio	t _i (dias)	Constante Cinética (h ⁻¹)	Erro Relativo
Calcário	BVbCL_B	3	$4,5 \times 10^{-3}$	0,06
	BVbCL_T	3	$3,2 \times 10^{-3}$	0,15
	BVbCL_E	3	$4,1 \times 10^{-3}$	0,12
	BVbCL_X	3	$1,2 \times 10^{-3}$	0,31
	BVbCL_BTEoX	3	$3,4 \times 10^{-3}$	0,30
Granito	BVbSR_B	3	$2,5 \times 10^{-3}$	0,09
	BVbSR_T	4	$1,9 \times 10^{-3}$	0,12
	BVbSR_E	4	$1,5 \times 10^{-3}$	0,23
	BVbSR_X	6	$1,1 \times 10^{-3}$	0,21
	BVbSR_BTEoX	5	$1,7 \times 10^{-3}$	0,14
Xisto	BVbXT_B	2	$3,9 \times 10^{-3}$	0,06
	BVbXT_T	3	$3,0 \times 10^{-3}$	0,09
	BVbXT_E	0	$5,9 \times 10^{-3}$	0,21
	BVbXT_X	1	$5,0 \times 10^{-3}$	0,26
	BVbXT_BTEoX	5	$3,8 \times 10^{-3}$	0,35

t_i – tempo de estabilização**3.5.2.4. ENSAIOS DE BIO-VENTILAÇÃO INOCULADOS**

Os ensaios de bio-ventilação inoculados realizaram-se num sistema em equilíbrio com sumidouros (aniquilação por advecção e por bio-degradação) e em estado transiente, pelo que o modelo utilizado na simulação foi igualmente um modelo de Nível 2b (Mackay, 2001). Neste modelo foi considerada uma cinética de pseudo primeira ordem, a geometria do sistema utilizado nos ensaios laboratoriais, os parâmetros intrínsecos dos solos estudados e as propriedades dos contaminantes utilizados. Com base nestes dados foram calculados as capacidades compartimentais de cada compartimento ambiental, o valor da fugacidade inicial no equilíbrio, a concentração inicial de contaminante em cada compartimento, o desaparecimento por bio-degradação e por advecção, a constante cinética do processo, as fugacidades ao longo do tempo, a quantidade de contaminante aniquilada ao longo do tempo, a concentração final de contaminante na fase gasosa, o consumo de oxigénio e a emissão de dióxido de carbono e finalmente as razões estequiométricas entre o oxigénio consumido e a massa biodegradada, entre o dióxido de carbono produzido e a massa degradada e entre o oxigénio consumido e o dióxido de carbono produzido. Este exercício foi aplicado aos três solos e aos quatro contaminantes (B, T, E e X), estudados individualmente ou em mistura

(BTEoX). Os cálculos efectuados são apresentados no Anexo VII. Nas Figuras 3.61 a 3.64 apresentam-se as concentrações de contaminante na fase gasosa calculadas e os valores experimentais. Em cada ensaio, a comparação entre as curvas experimental e calculada permitiu ainda estabelecer o período de estabilização (t_i). Na Tabela 3.15 é apresentada uma síntese dos resultados obtidos nos ajustes do modelo, indicando-se a duração do período inicial de estabilização e o erro relativo, calculado para cada situação estudada.

Os resultados obtidos nos estudos realizados em calcário (Figura 3.61) permitiram verificar que, para todos os contaminantes, o modelo simulou de forma adequada a evolução da concentração de contaminante na fase gasosa e apontou para valores semelhantes aos obtidos experimentalmente. No caso do BVCL_B, notou-se uma ligeira diferença nos valores finais, sendo as concentrações reais inferiores às teóricas.

Os resultados obtidos nos estudos realizados em granito (Figuras 3.62 e 3.63) conduziram a bons ajustes do modelo aos dados experimentais, após o período de estabilização; o modelo simulou de forma adequada a evolução da concentração de contaminante na fase gasosa e apontou para valores semelhantes aos obtidos experimentalmente.

Os resultados obtidos nos estudos realizados em xisto (Figura 3.64) conduziram, igualmente, a bons ajustes do modelo aos dados experimentais após o período de estabilização; o modelo simulou bem a evolução da concentração de contaminante na fase gasosa e apontou para valores semelhantes aos obtidos experimentalmente.

Na Tabela 3.15 é indicado o desfasamento inicial que correspondeu ao período de estabilização nos ensaios experimentais. Este período foi muito semelhante no calcário e no xisto (1 a 3 dias) e um pouco superior no granito (1 a 5 dias). À semelhança do que se verificou nos ensaios inoculados de bio-remediação, os valores das constantes cinéticas corroboraram a análise anteriormente apresentada (3.5.1), indicando que a remediação por bio-ventilação foi mais lenta no solo granítico do que no calcário e no xisto, sendo semelhante nestes dois solos.

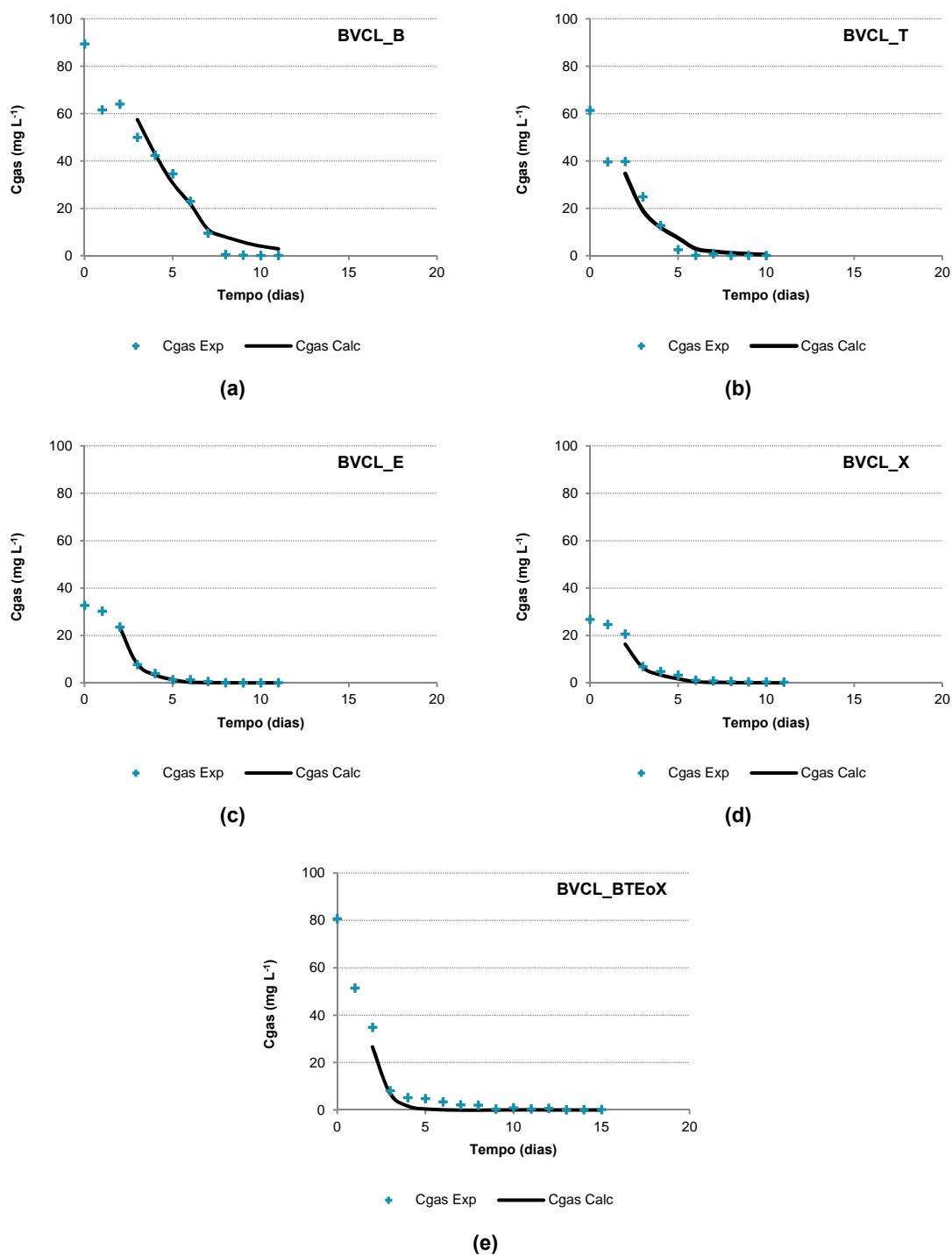


Figura 3.61 – Ensaio de bio-ventilação realizados em calcário inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: (a) Benzeno; (b) Tolueno; (c) Etilbenzeno; (d) Xileno; (e) BTEoX.

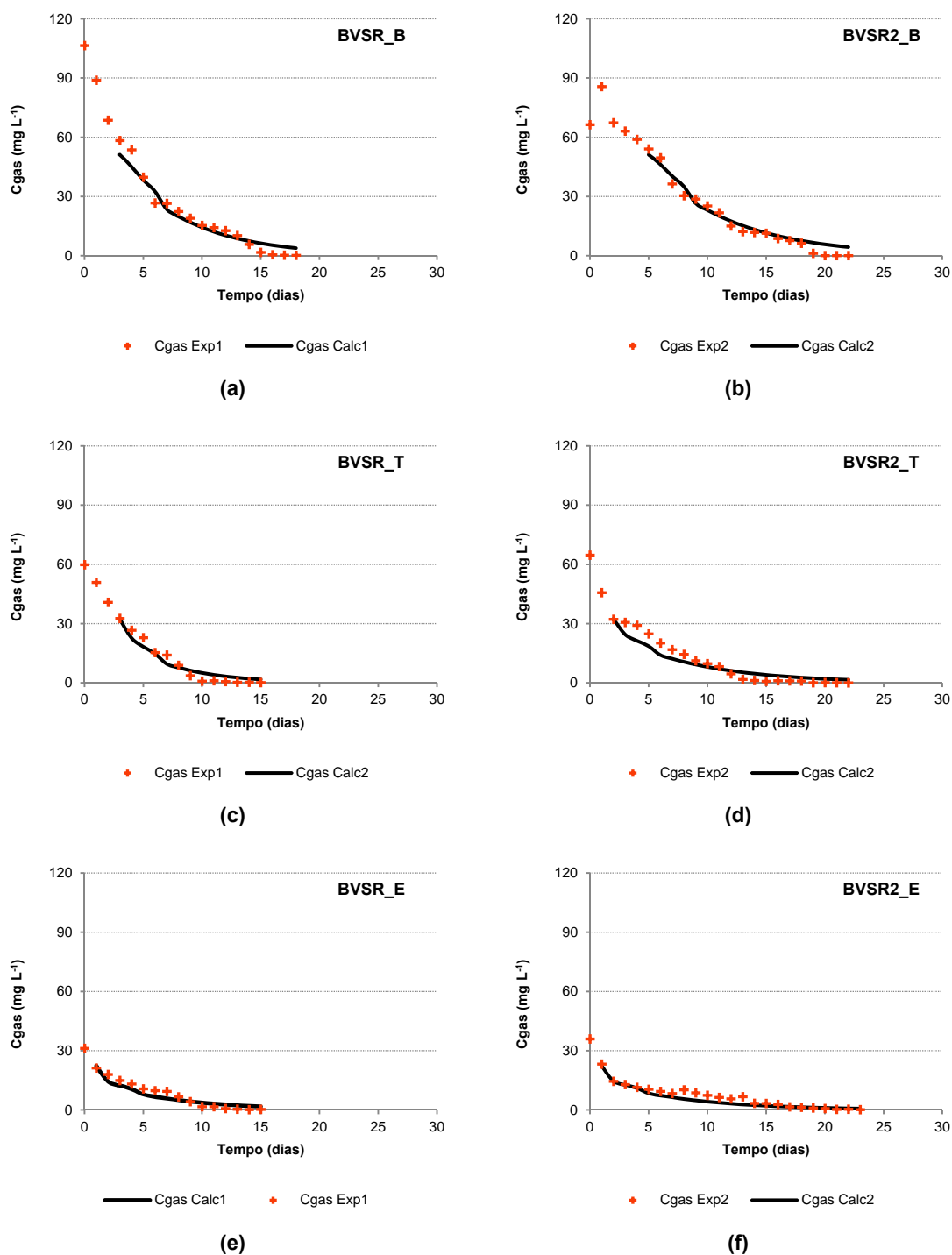


Figura 3.62 – Ensaio de bio-ventilação realizados em granito inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: Benzeno, ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b); Tolueno, ensaio 1 (c) e ensaio 2 (d); Etilbenzeno, ensaio 1 (e) e ensaio 2 (f).

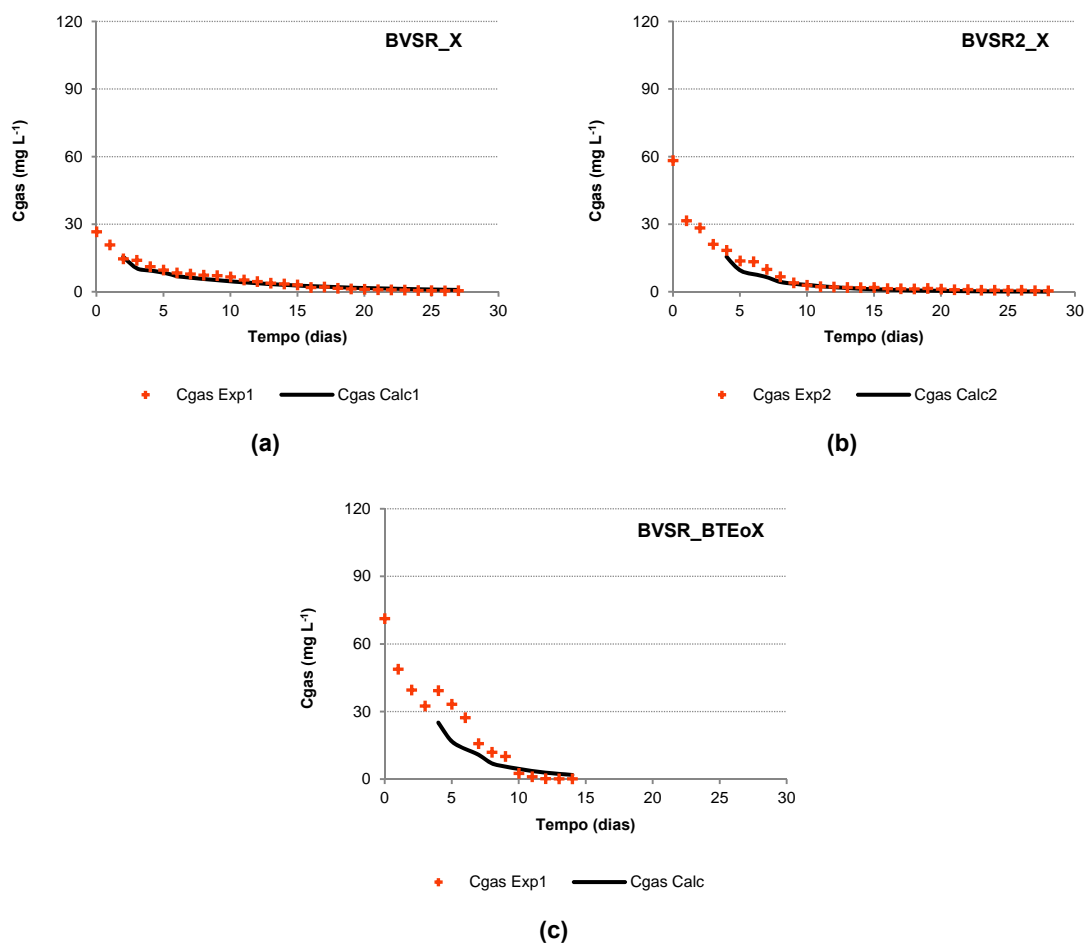


Figura 3.63 – Ensaio de bio-ventilação realizados em granito inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: Xileno, ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b); BTEoX (c).

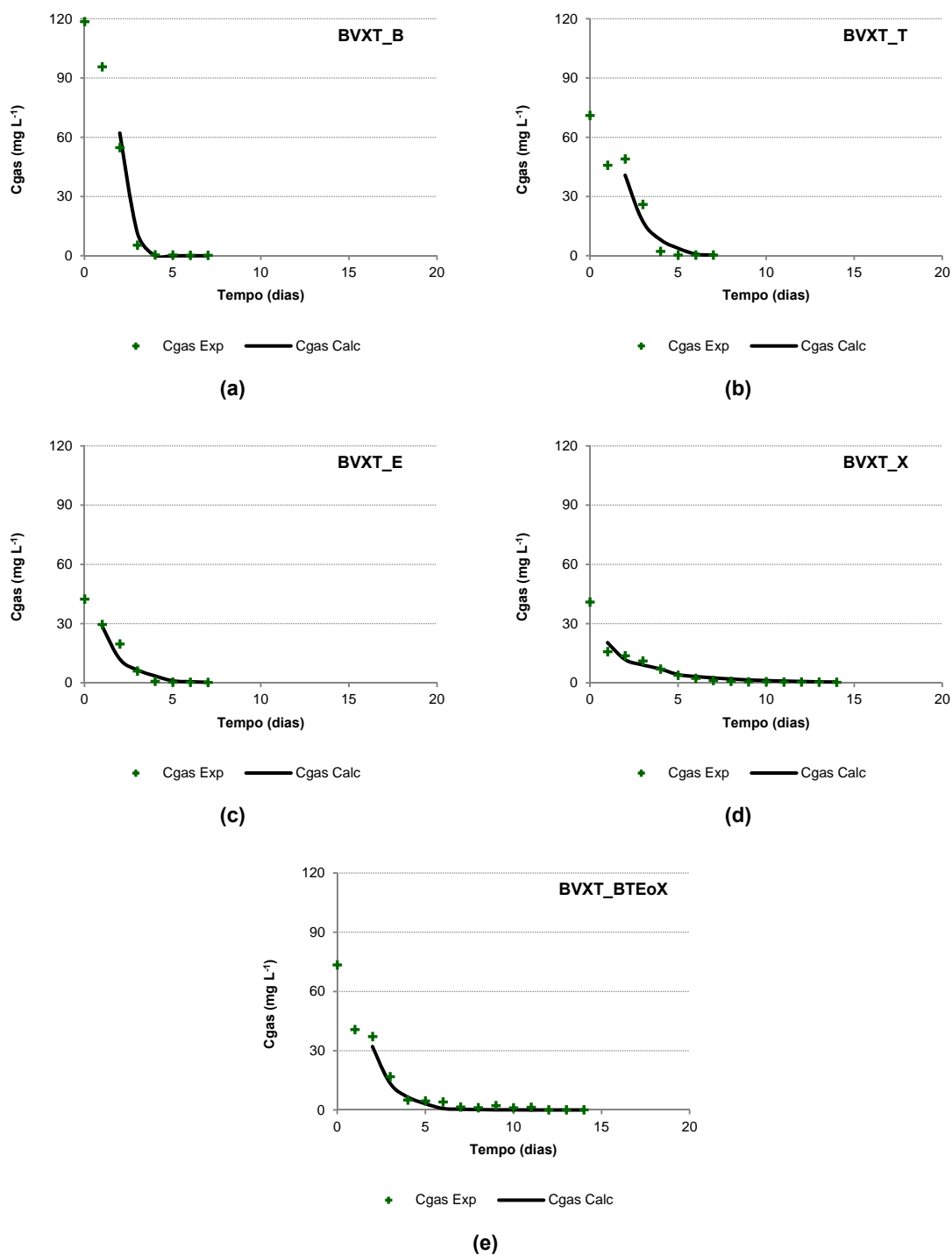


Figura 3.64 – Ensaio de bio-ventilação realizados em xisto inoculado. Comparação das concentrações de contaminante na fase gasosa obtidas experimentalmente com as calculadas com base nas capacidades compartimentais: (a) Benzeno; (b) Tolueno; (c) Etilbenzeno; (d) Xileno; (e) BTEoX.

Tabela 3.15 – Síntese dos resultados obtidos nos ajustes dos modelos baseados na capacidade compartimental dos compartimentos ambientais aplicados aos ensaios de bio-ventilação inoculados

	Ensaio	t _i (dias)	Constante Cinética (h ⁻¹)	Erro Relativo
Calcário	BVCL_B	3	$1,2 \times 10^{-2}$	0,29
	BVCL_T	2	$1,8 \times 10^{-2}$	0,33
	BVCL_E	2	$3,3 \times 10^{-2}$	0,06
	BVCL_X	2	$2,6 \times 10^{-2}$	0,25
	BVCL_BTEoX	2	$4,8 \times 10^{-2}$	0,25
Granito	BVSR_B	3	$5,2 \times 10^{-3}$	0,17
	BVSR2_B	5	$4,2 \times 10^{-3}$	0,21
	BVSR_T	3	$7,9 \times 10^{-3}$	0,28
	BVSR2_T	2	$4,8 \times 10^{-3}$	0,29
	BVSR_E	1	$5,6 \times 10^{-3}$	0,27
	BVSR2_E	1	$5,1 \times 10^{-3}$	0,18
	BVSR_X	4	$3,7 \times 10^{-3}$	0,19
	BVSR2_X	4	$7,6 \times 10^{-3}$	0,29
	BVSR_BTEoX	4	$8,3 \times 10^{-3}$	0,50
Xisto	BVXT_B	2	$7,0 \times 10^{-2}$	0,26
	BVXT_T	2	$2,9 \times 10^{-2}$	0,36
	BVXT_E	1	$2,4 \times 10^{-2}$	0,25
	BVXT_X	1	$1,0 \times 10^{-2}$	0,32
	BVXT_BTEoX	2	$2,8 \times 10^{-2}$	0,27

t_i – tempo de estabilização

Nas Tabelas 3.16, 3.17 e 3.18 é apresentada uma síntese dos resultados obtidos a partir das evoluções no tempo das concentrações de oxigénio e dióxido de carbono na fase gasosa. Foram calculadas a massa de oxigénio consumido e a massa de dióxido de carbono produzida, as quais foram relacionadas entre si e com a quantidade de contaminante biodegradada durante os ensaios de bio-ventilação inoculados; foram ainda determinadas as respectivas relações estequiométricas.

A análise dos resultados apresentados permitiu verificar que a relação estequiométrica entre a massa de oxigénio consumida e a massa de contaminante biodegradada obtida experimentalmente foi, em todos os casos, muito inferior à teoricamente esperada; no calcário os consumos reais de oxigénio estiveram compreendidos entre 29 e 44 % do teoricamente previsto, no granito variaram entre 10 e 41 % do previsto e no xisto entre 34 e 40 %. Situação análoga aconteceu com a relação estequiométrica entre a massa de dióxido de carbono

produzida e a massa de contaminante biodegradada; no calcário as produções reais de dióxido de carbono estiveram compreendidos entre 24 e 36 % do teoricamente previsto, no granito variaram entre 13 e 43 % do previsto e no xisto entre 44 e 51 %. Estes factos poderão estar relacionados com a existência nas vias metabólicas de reacções que ocorrem sem consumo de oxigénio e sem produção de dióxido de carbono.

Ao observar as relações estequiométricas entre a massa de oxigénio consumida e a massa de dióxido de carbono produzida verificou-se que os valores obtidos experimentalmente foram mais próximos dos valores teóricos; no calcário estiveram compreendidos entre 123 e 141 % do teoricamente previsto, no granito variaram entre 84 e 119 % do previsto e no xisto entre 75 e 84 %. Esta relação estequiométrica foi sensível ao tipo de solo como se pode verificar nos valores obtidos. Nos ensaios realizados em calcário os valores obtidos foram, para todos os contaminantes, superiores aos teoricamente previstos e aos obtidos no granito; por sua vez, os valores obtidos para o granito foram mais próximos dos teoricamente esperados e superiores aos obtidos no xisto, sendo os valores obtidos no xisto sempre inferiores ao teoricamente esperado. No calcário a razão estequiométrica entre a massa de oxigénio consumida e a massa de dióxido de carbono produzida foi em média 1,66, no granito de 1,15 e no xisto de 1,01, sendo a média teórica, sem se considerar a influência do tipo de solo, 1,29. Este facto poderá também estar relacionado com a fracção argilosa presente nos solos e consequentemente com o modo como os contaminantes se distribuem pelas diferentes fases nos solos estudados.

Tabela 3.16 – Síntese dos resultados obtidos na interpretação dos resultados experimentais da respirometria nos ensaios de bio-ventilação inoculados realizados em calcário

	BVCL_B	BVCL_T	BVCL_E	BVCL_X	BVCL_BTEoX
Duração do ensaio (dias)	11	10	10	11	15
Quantidade total de contaminante (mmol)	5,12	4,34	3,77	3,77	4,18
Massa biodegradada (mmol)	4,43	4,10	3,72	3,71	4,15
% de massa biodegradada	86,52	94,56	98,54	98,49	99,28
Massa O ₂ consumida (mmol)	9,54	12,96	17,05	13,34	16,69
Relação estequiométrica teórica "O ₂ /Contaminante"	7,50	9,00	10,50	10,50	9,40
Relação estequiométrica "O ₂ /Contaminante degradado"	2,15	3,16	4,59	3,59	4,02
Massa CO ₂ produzida (mmol)	5,42	7,89	10,54	8,09	10,23
Relação estequiométrica teórica "CO ₂ /Contaminante degradado"	6,00	7,00	8,00	8,00	7,30
Relação estequiométrica "CO ₂ /Contaminante"	1,43	1,92	2,84	2,18	2,47
Relação estequiométrica teórica "O ₂ /CO ₂ "	1,25	1,29	1,31	1,31	1,29
Relação estequiométrica obtida "O ₂ /CO ₂ "	1,76	1,64	1,62	1,65	1,63

Tabela 3.17 – Síntese dos resultados obtidos na interpretação dos resultados experimentais da respirometria nos ensaios de bio-ventilação inoculados realizados em granito

	BVSR_B	BVSR2_B	BVSR_T	BVSR2_T	BVSR_E	BVSR2_E	BVSR_X	BVSR2_X	BVSR_BTEoX
Duração do ensaio (dias)	18	22	15	22	15	23	27	28	14
Quantidade total de contaminante (mmol)	5,12	5,12	4,34	4,34	3,77	3,77	3,77	3,77	4,18
Massa biodegradada (mmol)	3,76	3,57	3,74	3,44	3,03	3,20	3,13	3,54	3,67
% de massa biodegradada	73,44	69,73	86,18	79,26	80,37	84,88	83,02	93,90	87,80
Massa O ₂ consumida (mmol)	6,23	10,13	9,37	12,76	11,28	10,80	4,15	8,88	3,41
Relação estequiométrica teórica “O ₂ /Contaminante”	7,50	7,50	9,00	9,00	10,50	10,50	10,50	10,50	9,40
Relação estequiométrica “O ₂ /Contaminante degradado”	1,66	2,84	2,51	3,71	3,72	3,38	1,33	2,51	0,93
Massa CO ₂ produzida (mmol)	5,30	7,85	8,64	10,34	9,44	8,78	3,37	5,69	8,98
Relação estequiométrica teórica “CO ₂ /Contaminante degradado”	6,00	6,00	7,00	7,00	8,00	8,00	8,00	8,00	7,30
Relação estequiométrica “CO ₂ /Contaminante”	1,41	2,20	2,31	3,01	3,12	2,74	1,08	1,61	2,45
Relação estequiométrica teórica “O ₂ /CO ₂ ”	1,25	1,25	1,29	1,29	1,31	1,31	1,31	1,31	1,29
Relação estequiométrica obtida “O ₂ /CO ₂ ”	1,18	1,29	1,08	1,23	1,19	1,23	1,23	1,56	0,38

Tabela 3.18 – Síntese dos resultados obtidos na interpretação dos resultados experimentais da respirometria nos ensaios de bio-ventilação inoculados realizados em xisto

	BVXT_B	BVXT_T	BVXT_E	BVXT_X	BVXT_BTEoX
Duração do ensaio (dias)	7	7	7	14	14
Quantidade total de contaminante (mmol)	5,12	4,34	3,77	3,77	4,18
Massa biodegradada (mmol)	5,08	4,19	3,62	3,47	4,08
% de massa biodegradada	99,22	96,54	96,02	89,12	97,61
Massa O ₂ consumida (mmol)	14,60	13,80	12,92	13,95	15,52
Relação estequiométrica teórica “O ₂ /Contaminante”	7,50	9,00	10,50	10,50	9,40
Relação estequiométrica “O ₂ /Contaminante degradado”	2,87	3,29	3,57	4,02	3,80
Massa CO ₂ produzida (mmol)	13,86	13,60	12,87	14,21	15,32
Relação estequiométrica teórica “CO ₂ /Contaminante degradado”	6,00	7,00	8,00	8,00	7,30
Relação estequiométrica “CO ₂ /Contaminante”	2,73	3,24	3,56	4,10	3,75
Relação estequiométrica teórica “O ₂ /CO ₂ ”	1,25	1,29	1,31	1,31	1,29
Relação estequiométrica obtida “O ₂ /CO ₂ ”	1,05	1,01	1,00	0,98	1,01

3.5.2.5. ANÁLISE GLOBAL

Os modelos aplicados apresentaram-se, de um modo geral, adequados à simulação dos ensaios de bio-remediação e de bio-ventilação nos solos e contaminantes estudados. Os valores calculados para a concentração na fase gasosa foram similares aos obtidos experimentalmente, na maioria das situações estudadas.

A razão estequiométrica teórica entre a massa de oxigénio consumida e a massa de dióxido de carbono produzida apresentou-se mais adequada para avaliar o potencial bio-degradador instalado no sistema do que a relação estequiométrica teórica entre a massa de oxigénio consumida e a massa de contaminante e a relação estequiométrica teórica entre massa de dióxido de carbono produzida e a massa de contaminante biodegradada. A razão estequiométrica entre a massa de oxigénio consumida e a massa de dióxido de carbono produzida revelou-se sensível ao tipo de solo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1. CONCLUSÕES

A caracterização dos três solos escolhidos para testar a bio-remediação assistida e a bio-ventilação quando contaminados com compostos orgânicos confirmou as acentuadas diferenças entre eles. Do ponto de vista geológico, os três solos pertencem a unidades litológicas representativas do território português, tendo o solo SR a sua génese num granito alcalino de duas micas, o solo CL é um calcário margoso e o solo XT é um xisto clorítico. Do ponto de vista geotécnico, a classificação unificada segundo a ASTM classifica o solo SR como sendo uma areia siltosa, o solo CL como areia argilosa e o solo XT como silte.

Os contaminantes seleccionados (B, T, E, X e BTEoX) permitiram observar diferentes respostas ao processo de reabilitação quando se varia o tipo de solo e permitiram também comprovar que as tecnologias em estudo são indicadas para a reabilitação de solos contaminados com estes compostos. Baseando-se a bio-ventilação simultaneamente em princípios físicos e biológicos, foi ainda possível estudar as comparticipações da volatilização e da bio-degradação.

A metodologia analítica desenvolvida para quantificação e monitorização da concentração dos contaminantes na fase gasosa revelou-se, uma vez rotinada, adequada e de utilização simples.

A respirometria respondeu sem grande atraso e retratou adequadamente a biodegradação. Os resultados obtidos no controlo da actividade microbiológica por respirometria revelaram grandes potencialidades de utilização desta ferramenta analítica no controlo da biodegradação.

Para o estudo da distribuição trifásica dos contaminantes nos solos fizeram-se ensaios de determinação das isotérmicas de equilíbrio para todos os contaminantes e todos os solos. Estes ensaios revelaram que o aumento do nível de contaminação provoca, independentemente do tipo de solo, um aumento da quantidade de contaminante que se encontra nas três fases constituintes dos solos. Aos resultados das isotérmicas foram ajustados modelos de adsorção de Langmuir e de Freundlich. O modelo de Freundlich apresentou-se favorável na maioria das situações, exibindo coeficientes de determinação mais elevados. No ajuste da equação de Freundlich, verificou-se que os maiores valores da constante (K_F) ocorrem para todos os contaminantes no calcário, denotando que este solo é o que apresenta maior capacidade de adsorção, o que deverá estar relacionado com a presença de maior quantidade de fracção argilosa. Pela proximidade dos valores das constantes de Freundlich obtidos para cada contaminante, pode concluir-se que o granito e o xisto apresentam tendencialmente capacidade de adsorção idêntica, tendo estas sido sempre baixas relativamente às observadas para o calcário.

A pressão de vapor dos contaminantes e a fracção argilosa dos solos foram os factores chave do processo. O calcário é o solo com maior fracção argilosa e foi o que apresentou maior capacidade de sorção. Os contaminantes com maior pressão de vapor tendem a apresentar-se com maiores concentrações na fase gasosa, enquanto os menos voláteis, apresentaram

concentrações mais elevadas na fase sólida. Os resultados obtidos permitiram ainda concluir que, na sorção, o efeito da composição mineralógica se sobrepõe ao efeito do teor em água, contrariamente ao postulado por alguns autores.

A realização dos ensaios exploratórios foi determinante na viabilização de todo o trabalho posteriormente desenvolvido. Os ensaios em meio líquido permitiram testar o consórcio microbiano seleccionado, adaptá-lo aos contaminantes (xileno e benzeno) e desenvolver o seu crescimento através de sucessivas culturas de enriquecimento. Os ensaios de degradação realizados, tanto em meio líquido como nos solos, permitiram concluir que o consórcio microbiano utilizado foi adequado à bio-degradação dos BTEX. Os resultados obtidos permitiram estabelecer que o inóculo a utilizar nos ensaios posteriores de bio-remediação deveria ser proveniente de segundas transferências, com nível de contaminação de 206 mg L⁻¹ para o contaminante xileno ou 280 mg L⁻¹ para o caso do contaminante benzeno.

A bio-amplificação realizada com este consórcio foi bem-sucedida. Efectivamente, os ensaios exploratórios revelaram capacidade de adaptação do consórcio ao aumento de escala do ensaio, o que perspectivou um bom indicador para a passagem a escalas piloto. Os solos contaminados foram então remediados, quer por bio-remediação assistida, quer por bio-ventilação, tendo sido conseguidas eficiências de remediação, nos testes de ambas as tecnologias, muito elevadas em todos os ensaios inoculados – superiores a 97%, tendo apenas variado o tempo de remediação (entre 10 e 17 dias para o calcário, entre 15 e 42 dias para o granito e entre 6 e 21 dias para o xisto). A inoculação é uma técnica exequível, e mostrou que pode ser aplicada com sucesso a diversos subsolos.

Os resultados sugeriram que a composição mineralógica, nomeadamente o conteúdo em minerais de argila, foi um factor relevante no tempo de remediação. Em todos os casos, o solo residual granítico, que apresenta na sua composição elevada percentagem de caulinite, apresentou maior tempo de remediação. Pelo contrário, o xisto, que não possui na sua composição minerais de argila, foi o solo no qual o tempo de remediação foi, na maioria dos casos, menor. Também a tecnologia utilizada na remediação condicionou o tempo de remediação, para o mesmo solo e o mesmo contaminante, o tempo de remediação foi, geralmente, mais curto na bio-ventilação do que bio-remediação; a diferença foi mais notória na descontaminação do solo residual granítico do que no calcário e no xisto. O cálculo das constantes cinéticas das reacções em ambos os processos em estudo, indicou ser o xileno o contaminante com cinética de degradação mais lenta em todos os tipos de solo.

A modelização matemática da fenomenologia envolvida em cada um dos ensaios experimentais realizados (bio-remediação assistida e bio-ventilação em solos contaminados inoculados e não inoculados) conduziu a bons ajustes dos modelos aos dados experimentais. Para todos os ensaios, a aplicação dos modelos fez ressaltar a existência de um período de estabilização inicial com duração variável, dependendo do tipo de solo e do contaminante presente. A aplicação destes modelos matemáticos, baseados no conceito de fugacidade e nas

capacidades compartimentais de Mackay, para além de permitir prever o comportamento dos sistemas estudados a uma escala piloto e industrial, confirmou que a remediação do solo granítico será mais lenta (apresenta as menores constantes cinéticas) do que a dos solos calcário e xistoso, fornecendo ainda o período de estabilização inicial, informação fundamental para efeitos de projecto. Estes modelos matemáticos têm potencialidades para poderem, com generalização, ser implementados em contexto de intervenção ambiental.

A razão estequiométrica teórica entre a massa de oxigénio consumida e a massa de dióxido de carbono produzida apresentou-se mais adequada para avaliar o potencial bio-degradador instalado no sistema do que a relação estequiométrica teórica entre a massa de oxigénio consumida e a massa de contaminante e a relação estequiométrica teórica entre massa de dióxido de carbono produzida e a massa de contaminante biodegradada. A razão estequiométrica entre a massa de oxigénio consumida e a massa de dióxido de carbono produzida revelou-se sensível ao tipo de solo.

Foi a primeira vez que este tipo de modelos, desenvolvidos para compartimentos de grande volume, foram aplicados com sucesso a micro ambientes. Comprovou-se a importância da diversidade dos substratos nesta fenomenologia, o que não tem sido considerado nas investigações publicadas.

4.2. PERSPECTIVAS FUTURAS

O trabalho desenvolvido revelou novos horizontes, tanto ao nível da continuidade dos estudos realizados como ao nível de estudos complementares. Neste sentido sugere-se:

- ✓ a realização desta investigação utilizando outro tipo de materiais geológicos, principalmente os solos residuais e os solos aluvionares;
- ✓ a realização de ensaios nos mesmos solos, mas utilizando outros grupos de contaminantes ou misturas de contaminantes. Sugere-se a utilização de compostos orgânicos semivoláteis não halogenados e o estudo da influência da adição de biocombustíveis;
- ✓ a realização de ensaios utilizando amostras de solos não remexidas;
- ✓ a realização de ensaios à escala piloto que permitiriam aprofundar a influência de outros parâmetros que aqui foram indirectamente considerados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-El-Sha'r, W. Y., & Al-Zou'by, J. Y. (2005). Significance of well locations and flow rates in bioventing systems design. *Vadose Zone Journal*, 4(2), 354-359. doi: 10.2136/vzj2004.0055
- Albergaria, J. T., Alvim-Ferraz, M. C., & Delerue-Matos, C. (2008). Soil vapor extraction in sandy soils: Influence of airflow rate. *Chemosphere*, 73(9), 1557-1561. doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.07.080
- Albergaria, J. T. (2010a). Previsão do tempo de remediação de solos contaminados usando a extracção de vapor. PhD, Universidade do Porto, Porto.
- Albergaria, J. T., Alvim-Ferraz, M. C., & Delerue-Matos, C. (2010b). Estimation of pollutant partition in sandy soils with different water contents. *Environmental Monitoring and Assessment*, 171(1-4), 171-180. doi: 10.1007/s10661-009-1269-y
- Aspray, T., Carvalho, D., & Philp, J. (2007). Application of soil slurry respirometry to optimise and subsequently monitor ex situ bioremediation of hydrocarbon-contaminated soils. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 60(4), 279-284.
- ATSDR. (2000). Toxicological profile for toluene. Atlanta, Georgia: US Department of Health and Human Services Retrieved from <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp56.pdf>.
- ATSDR. (2007a). Toxicological profile for benzene. Atlanta, Georgia: US Department of Health and Human Services Retrieved from <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp56.pdf>.
- ATSDR. (2007b). Toxicological profile for xylene. Atlanta, Georgia: US Department of Health and Human Services Retrieved from <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp71.pdf>.
- ATSDR. (2010). Toxicological profile for ethylbenzene. Atlanta, Georgia: United States Department of Health and Human Services. Retrieved from <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp110.pdf>.
- Bachman, J., Kanan, S., & Patterson, H. (2001). Monitoring laboratory-scale bioventing using synchronous scan fluorescence spectroscopy: analysis of the vapor phase. *Environmental Pollution*, Volume 113(2), 155-162.
- Bailey, G. W., White, J. L., & Rothberg, T. (1968). Adsorption of Organic Herbicides by Montmorillonite: Role of pH and Chemical Character of Adsorbate. *Soil Science Society of America* 32(2), 222-234.
- Barbosa, B., Soares, A. F., Rocha, R. B., Manuppella, G., & Henriques, M. H. (Cartographer). (2008). Carta Geológica de Portugal, na escala de 1:50 000 - Folha 19-A (Cantanhede).

Begonha, A. J. (1997). Meteorização do granito e deterioração da pedra em monumentos e edifícios da cidade do Porto. PhD, Universidade do Minho, Braga.

Bernardo de Sousa, M., Sequeira, A. D., Coteló Neiva, J., Neiva, A., M., & Azevedo, M. (Cartographer). (1989). Carta Geológica de Portugal, na escala de 1:50 000 - Folha 10D (Alijó).

CCE (2006). Comunicação da Comissão ao Conselho, ao Parlamento Europeu, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões. Estratégia temática de protecção do solo. COM(2006)231 final. Bruxelas: Comissão das Comunidades Europeias.

Chiou, M., & Li, H. (2002). Equilibrium and kinetic modeling of adsorption of reactive dye on cross-linked chitosan beads. *Journal of Hazardous Materials*, 93(2), 233-248. doi: 10.1016/s0304-3894(02)00030-4

Clesceri, L., Greenberg, A., & Eaton, A. (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater: American Public Health Association.

Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P., Kullberg, J., & (Editores). (2006). *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria*. Évora: Universidade de Évora.

Downey, D., Miller, R., & Dragoo, T. (2004). Procedures for conducting bioventing pilot tests and long-term monitoring of bioventing systems. (NTIS: ADA423587). San Antonio, Texas: Retrieved from: <http://stinet.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA423587&Location=%20U2&doc=GetTRDoc.pdf>.

EEA (2009). Overview of contaminants affecting soil and groundwater in Europe. Retrieved from http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/overview-of-contaminants-affecting-soil-and-groundwater-in-europe/csi015_fig03.eps/image_original.

EEA (2010). The European environment – state and outlook 2010 –soil. Luxembourg: European Environment Agency.

Eweis, J., Ergas, S., Chang, D., & Schroeder, E. (1999). *Principios de Biorrecuperación* (J. V. Inaki Monzón, Trans.). Madrid: WCB/McGraw-Hill.

FAO (2006). World reference base for soil resources 2006 - A framework for international classification, correlation and communication. Rome: United Nations Retrieved from <http://www.fao.org>.

Fernandes, V. C., Albergaria, J. T., Oliva-Teles, T., Delerue-Matos, C., & De Marco, P. (2009). Dual augmentation for aerobic bioremediation of MTBE and TCE pollution in heavy metal-contaminated soil. *Biodegradation*, 20(3), 375-382. doi: 10.1007/s10532-008-9228-9

Ferreira, A. M. (2000). Dados geoquímicos de base de sedimentos fluviais de amostragem de baixa densidade de Portugal Continental: estudo de factores de variação regional. Departamento de Geociências, Doutoramento.
Retrieved from <http://hdl.handle.net/10400.9/542>

Ferreira, W. C., & Sousa, J. C. (1998). Microbiologia (Vol. 1). Lidel - Edições Técnicas. ISBN: 978-972-757-024-9

Fiúza, A. (2009a). Considerações sobre tecnologias de reabilitação de solos contaminados. Indústria e Ambiente, 54, 14 - 17.

Fiúza, A. (2009b). Reabilitação de solos e aquíferos contaminados, FEUP.

Fiúza, A. (2010). Quimodinâmica a Análise de Risco Ambiental, FEUP.

Gardin, H., Lebeault, J. M., & Pauss, A. (1999). Biodegradation of xylene and butyl acetate using an aqueous-silicon oil two-phase system. Biodegradation, 10(3), 193-200. doi: 10.1023/a:1008328318442

Gómez-Lahoz, C., Rodríguez Maroto, & Wilson, D. (1994). Biodegradation Phenomena during Soil Vapor Extraction. A High-Speed Non-Equilibrium Model. Separ. Sci. Technol., 29(4), 429-463.

Green, R. E., & Karickhoff, S. W. (1990). Sorption Estimates for Modeling. In H. H. C. (Ed.) (Ed.), Pesticides in the Soil Environment: Processes, Impacts and Modeling (pp. 79-101).

Hinchee, R. (1994). Bioventing of petroleum hydrocarbons Handbook of Bioremediation (pp. 39-59). Boca Raton: Lewis Pub.

Hopkins, J., & Hosford, M. (2009a). Contaminants in soil: updated collation of toxicological data and intake values for humans. Benzene (Science Report SC050021). Bristol: UK Environment Agency Retrieved from <http://a0768b4a8a31e106d8b0-50dc802554eb38a24458b98ff72d550b.r19.cf3.rackcdn.com/scho0309bpqp-e-e.pdf>.

Hopkins, J., & M., H. (2009b). Contaminants in soil: updated collation of toxicological data and intake values for humans. Toluene. (Science Report SC050021). Bristol: UK Environment Agency Retrieved from <http://a0768b4a8a31e106d8b0-50dc802554eb38a24458b98ff72d550b.r19.cf3.rackcdn.com/scho0309bpqq-e-e.pdf>.

ILT (2013). Visible / IR Lamps for NDIR Gas Sensors, from <http://www.intl-lighttech.com/sites/default/files/pdf/application/ndir-gas-sensor.pdf>

Jeffries, J., & Martin, I. (2009). Updated technical background to the CLEA model. (Science Report SC050021/SR3). Bristol: UK Environment Agency Retrieved from

http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Research/CLEA_Report_-_final.pdf.

Jones, J. B. (2001). Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis: CRC Press.

Jorge, C. R. (2003). Contaminação/descontaminação de solos com gasolina : Influência das características dos solos. PhD, Universidade do Porto, Porto.

Khalfaoui, M., Knani, S., Hachicha, M., Lamine, A., & Ben. (2003). New theoretical expressions for the five adsorption type isotherms classified by BET based on statistical physics treatment. *Journal of Colloid and Interface Science*, 263(2), 350-356. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0021-9797\(03\)00139-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0021-9797(03)00139-5)

Kuo, J. (1999). Practical design calculations for groundwater and soil remediation: Lewis.

Lin, T., Pan, P., & Cheng, S. (2010). Ex situ bioremediation of oil-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 176(1-3), 27-34. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.10.080

Mackay, D. (2001). Multimedia Environmental Models - The Fugacity Approach. Boca Raton, Estados Unidos da América: Lewis Publishers.

Madigan, M., Martinko, J., Dunlap, P., & Clark, D. (2009). *Biology of Microorganisms* (12th ed.): Pearson.

Magalhães, S., Ferreira Jorge, R., & Castro, P. (2009). Investigations into the application of a combination of bioventing and biotrickling filter technologies for soil decontamination processes - A transition regime between bioventing and soil vapour extraction. *Journal of Hazardous Materials*, 170(2-3), 711-715.

Malina, G., Grotenhuis, J. T. C., & Rulkens, W. H. (2002). Vapor Extraction/Bioventing Sequential Treatment of Soil Contaminated with Volatile and SemiVolatile Hydrocarbon Mixtures. *Bioremediation Journal*, 6(2), 159-176. doi: 10.1080/10588330208951211

Margesin, R., Zimmerbauer, A., & Schinner, F. (2000). Monitoring of bioremediation by soil biological activities. *Chemosphere*, 40(4), 339-346. doi: 10.1016/s0045-6535(99)00218-0

Mateus, A. C. (2008). Solo: a pele da Terra. Paper presented at the Solo: a pele da Terra, Lisboa.

Matos Fernandes, M. (2006). *Mecânica dos Solos. Conceitos e Princípios Fundamentais* (Vol. I). Porto.

Miller, J. N., & Miller, J. C. (2005). *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry* (5th ed.). Harlow, England: Pearson Education Limited.

- Mohapatra, D., Mishra, D., Chaudhury, R., & Das, R. (2007). Arsenic (V) adsorption mechanism using kaolinite, montmorillonite and illite from aqueous medium. *Environmental Science and Health, Part A - Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 42(4), 463-469. doi: 10.1080/10934520601187666
- Møller, J., Winther, P., Lund, B., Kirkebjerg, K., & Westermann, P. (1996). Bioventing of diesel oil-contaminated soil: comparison of degradation rates in soil based on actual oil concentration and on respirometric data. *Journal of Industrial Microbiology*, 16, 110-116.
- Morgan, H., Jeffries, J., Waterfall, E., & Earl, N. (2009a). Soil Guideline values for benzene in soil. (Science Report SC050021). Bristol: UK Environment Agency Retrieved from <http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Research/SCHO0309BPQI-e-e.pdf>.
- Morgan, H., Earl, N., Waterfall, E., & Jeffries, J. (2009b). Soil guideline values for ethylbenzene in soil. (Science Report SC050021). Bristol: UK Environment Agency Retrieved from <http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Research/SCHO0309BPQK-e-e.pdf>.
- Morgan, H., Jeffries, J., Búrca, R. D., & Earl, N. (2009c). Soil guideline values for xylene in soil. (Science Report SC050021). Bristol: UK Environment Agency Retrieved from <http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Research/SCHO0309BPQL-e-e.pdf>.
- OCDE (2012). World Oil Outlook (James Griffin, Alvino-Mario Fantini ed.). Viena, Austria: Organization of the Petroleum Exporting Countries.
- Oliveira, J. T., Pereira, E., Ramalho, M., Antunes, M. T., & Monteiro, J. H. (Cartographer). (1992). Carta Geológica de Portugal, na escala 1:500000
- Osterreicher-Cunha, P., Vargas, E. A., Guimaraes, J. R. D., Campos, T. M. P., Nunes, C. M. F., Costa, A., & Mano, D. M. (2004). Evaluation of bioventing on a gasoline-ethanol contaminated undisturbed residual soil. *Journal of Hazardous Materials*, 110(1-3), 63-76. doi: 10.1016/j.jhazmat.2004.02.037
- Padrão, M. J. (2004). Reabilitação de solos contaminados com produtos petrolíferos utilizando técnicas agrárias. Mestrado, Universidade do Porto, Porto.
- Pereira, E., Ribeiro, A., Carvalho, G., Noronha, F., Ferreira, N., & Monteiro, J. H. (Cartographer). (1992). Carta Geológica de Portugal na escala 1/200000 - Folha 1.
- Perry, R., & Green, D. (1984). Perry's Chemical Engineer' Handbook (6th Edition ed.): McGraw-Hill.

- Proença, M. (2011). Preparação de carvões activados a partir de biomassa e de matrizes zeolíticas. Mestrado, FCT-UNL, Lisboa. Retrieved from http://run.unl.pt/bitstream/10362/5983/1/Proenca_2011.pdf
- Rathfelder, K., Lang, J., & Abriola, L. (2000). A numerical model (MISER) for the simulation of coupled physical, chemical and biological processes in soil vapor extraction and bioventing systems. *Journal of Contaminant Hydrology*, 43, 239-270.
- Ribeiro, A., Antunes, M. T., Ferreira, M. P., Rocha, R. B., Soares, A. F., Zbyszewski, G., & Monteiro, J. H. (1979). *Introduction à la géologie générale du Portugal*. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.
- Ribeiro, A., Marques, F., Munhá, J., Castro, P., Pereira, E., Meireles, C., & Ferreira, N. (Cartographer). (2006). *Carta Geológica de Portugal na escala 1/200000 - Folha 2*.
- Ridder, B. (2010). orderseek - Finds chemical reaction order, from <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26621-orderseek-finds-chemical-reaction-order/content/orderseek.m>
- Róisín De Búrca, Morgan, H., Jeffries, J., & Earl, N. (2009). Soil guideline values for toluene in soil. . (Science Report SC050021). Bristol: UK Environment Agency Retrieved from <http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Research/SCHO0309BPQJ-e-e.pdf>.
- Ryu, Z., Zheng, J., Wang, M., & Zhang, B. (1999). Characterization of pore size distributions on carbonaceous adsorbents by DFT. *Carbon*, 37(8), 1257-1264. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-6223\(98\)00322-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-6223(98)00322-4)
- Sayles, G., Leeson, A., Trizinsky, M., & Rotstein, P. (1997). Field Test of Nonfuel Hydrocarbon Bioventing in Clayey-Sand Soil. *Bioremediation Journal*, 1(2), 123 — 133.
- Schwarze, R., Mothes, J., Obermeier, F., & Schreiber, H. (2004). Numerical Modeling of Soil Bioventing Processes – Fundamentals and Validation. *Transport in Porous Media*, 55(3), 257-273. doi: 10.1023/B:TIPM.0000013324.41889.df
- Servomex. (2013). Technology, from <http://www.servomex.com/servomex/web/web.nsf/en/technology>
- Shewfelt, K., Lee, H., & Zytner, R. (2005). Optimization of nitrogen for bioventing of gasoline contaminated soil. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 4(1), 29-42. doi: 10.1139/s04-040
- Sims, R. C. (1990). Soil remediation techniques at uncontrolled hazardous waste sites - A critical review. *Journal of Air Waste Manage*, 40(5), 704-732.

- Snedecor, G., & Cochran, W. (1989). *Statistical Methods* (8^a ed.). Iowa: Iowa State University Press.
- Soares da Silva, A. M. (Cartographer). (1983). *Carta Litológica - Noticia Explicativa I.13*. Retrieved from <http://sniamb.apambiente.pt/webatlas/>
- Sousa, J. C., Cerqueira, F., & Abreu, C. (2005). *Microbiologia: Protocolos Laboratoriais*
- Sousa Real, F. C. (Cartographer). (1987). *Carta Geológica - Noticia Explicativa I.12*. Retrieved from <http://sniamb.apambiente.pt/webatlas/>
- Sui, H., Li, X. G., & Jiang, B. (2005). Benzene, toluene and P-xylene interactions and the role of microbial communities in remediation using bioventing. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 83(2), 310-315.
- Suthersan, S. (1997). *Remediation engineering - design concepts*. Boca Raton, Estados Unidos da América: Lewis Publishers Inc.
- Suthersan, S., & Payne, F. (2005). *In situ remediation engineering*. Boca Raton, Estados Unidos da América: CRC Press
- Tanzeer, H. (2013). *Smouldering combustion for soil remediation: two dimensional experiments and modelling*. Master of Engineering Science, University of Western Ontario, London, Ontario; Canada. Retrieved from <http://ir.lib.uwo.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=2447&context=etd>
- Tyagy, M., Fonseca, M., & Carvalho, C. (2011). Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes. *Biodegradation*, 22, 231-241.
- USEPA (1994). *How To Evaluate Alternative Cleanup Technologies For Underground Storage Tank Sites: A Guide For Corrective Action Plan Reviewers – Cap. III – Bioventing*. Retrieved from EPA 510-B-94-003; EPA 510-B-95-007; and EPA 510-R-04-002.
- USEPA (2006a). *In situ treatment technologies for contaminated soil*. (EPA 542/F-06/013). Retrieved from <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1000STG.pdf>.
- USEPA (2006b). *In Situ and Ex Situ Biodegradation Technologies for Remediation of Contaminated Sites*. Retrieved from <http://nepis.epa.gov/EPA/html/DLwait.htm?url=/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=600003SE.PDF>.
- USEPA (2007). *Treatment technologies for site cleanup: annual status report*. 12th Ed.: USEPA Retrieved from <http://www.clu-in.org/asr/>.

USEPA (2010). Superfund remedy report: 13th ed. (EPA-542-R-10-004). Retrieved from http://www.brownfieldstsc.org/pdfs/SRR_13th_MainDocument.pdf.

USSLS (1954). Diagnosis and Improvement of saline and alkali soils. Washington: United States Department of Agriculture.

Vila, M. C. (2004). Reabilitação de solos observada através de respirometria - análise de sinal em sistemas biológicos. PhD, Universidade do Porto, Porto.

Weber, W. J., & Digiano, F. A. (1996). "Process dynamics in environmental systems". New York: John Wiley & Sons, Inc.

WHO (2000). Air quality guidelines for Europe. (91). Copenhagen: WHO Regional Publications, European Series Retrieved from <http://helid.desastres.net/en/d/Js13481e/4.1.9.html>.

ANEXO I - CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

Caracterização geotécnica do solo residual granítico:



Laboratório de Geotecnia e
Materiais de Construção

RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2008510120086889

DATA: 2008-12-02

PÁGINA: 1/2

ENSAIO REALIZADO:

Preparação por via Seca de Amostras para Ensaio de Identificação
Especificação do LNEC E 195/1966

REFERÊNCIA DA AMOSTRA:

Amostra apresentada pelo requerente.Solo residual granítico

DATA DE RECEPÇÃO DA AMOSTRA :

2008-11-24

CLIENTE :

ISEP
Rua Dr. Bernardino de Almeida,nº 431
4200 485 Porto

OBRA :

Projecto

OBSERVAÇÕES:

O presente relatório diz respeito exclusivamente aos itens ensaiados e só pode ser reproduzido na íntegra, excepto quando haja autorização expressa do LGMCM

RESPONSÁVEL PELO SECTOR

Eduardo Neves, Engº

O DIRECTOR TÉCNICO DO LGMCM

Adriano Teixeira, Engº



CICCOPN - LGMCM - Rua de Espinhosa - 4475-699 Avioso S. Pedro - Maia | T 229866448 | F 229866498 | lgmc@ciccopn.pt | www.ciccopn.pt

PS010

02/12/2008 15:58



Laboratório de Geotecnia e
Materiais de Construção

RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2008510120086889

DATA: 2008-12-02

PÁGINA: 2/2

Processo utilizado na secagem da amostra		Ao Ar
Método utilizado na selecção da amostra		Esquartelamento
m ₁ - Massa da amostra seleccionada	(g)	572,0
Diâmetro nominal das maiores partículas	(mm)	4,75
m ₂ - Massa do material retido no peneiro de 2,00 mm de abertura	(g)	32,42
m ₃ - Massa do material passado no peneiro de 2,00 mm de abertura	(g)	512,52
m ₄ - Massa do material passado no peneiro de 0,420 mm de abertura	(g)	---



CICCOPI - LGMC - Rua de Espinhosa - 4475-699 Avioso S. Pedro - Maia | T 229866448 | F 229866498 | lgmc@ciccopi.pt | www.ciccopi.pt

02/12/2008 15:58



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2008510120086885

DATA: 2008-12-02

PÁGINA: 1/4

ENSAIO REALIZADO:

Análise Granulométrica
Especificação do LNEC E 196/1966

REFERÊNCIA DA AMOSTRA:

Amostra apresentada pelo requerente. Solo residual granítico

DATA DE RECEPÇÃO DA AMOSTRA :

2008-11-24

CLIENTE :

ISEP
Rua Dr. Bernardino de Almeida, n.º 431
4200-485 Porto

OBRA :

Projecto

OBSERVAÇÕES:

O presente relatório diz respeito exclusivamente aos itens ensaiados e só pode ser reproduzido na íntegra, excepto quando haja autorização expressa do LGMC

RESPONSÁVEL PELO SECTOR

O DIRECTOR TÉCNICO DO LGMC

Eduardo Neves, Eng.º

Adriano Teixeira, Eng.º



CICCOPI - LGMC - Rua de Espinhosa - 4475-699 Avioso S. Pedro - Maia | T 229866448 | F 229866498 | lgmc@ciccopi.pt | www.ciccopi.pt

PS005

02/12/2008 15:50



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2008510120086885

DATA: 2008-12-02

PÁGINA: 2/4

m_T - Massa total da amostra seca ao ar	(g)	572,0
m_{10} - Massa total da fracção retida no peneiro 2,00 mm	(g)	31,37
W_o - Teor em água do material passado no peneiro 2,00 mm	(%)	5,27
m_1 - Massa total da amostra = $m_{10} + [(m_T - m_{10}) * 100 / (100 + W_o)]$	(g)	544,94
N'_{10} - Percentagem de material grosso = $m_{10} / m_1 * 100$	(%)	5,76

A. Material grosso (retido no peneiro de 2,00 mm de abertura)

Abertura dos Peneiros (mm)	Massa Retida m_x (g)	% Retida $N_x = 100 * m_x / m_1$ (%)	% Retida Acumulada N'_x (%)	% Acumulados Passados $N''_x = 100 - N'_x$ (%)
76,1	0,00	0,00	0,00	100,00
50,8	0,00	0,00	0,00	100,00
38,1	0,00	0,00	0,00	100,00
25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
9,51	0,00	0,00	0,00	100,00
4,76	1,27	0,23	0,23	99,77
2,00	30,10	5,52	5,76	94,24

B. Material fino (passado no peneiro de 2,00 mm de abertura)

m_o - Massa de solo seco ao ar utilizada	(g)	133,43
--	-----	--------

B1. Com pré-tratamento

Solução utilizada no pré-tratamento	
m_b - Massa do solo seco após pré-tratamento	(g)
N_p - Perda no pré-tratamento = $100 - (m_b * (100 + W_o) / m_o)$	(%)

B2. Sem pré-tratamento

m_b - Massa do material fino utilizado = $m_o * 100 / (100 + W_o)$	(g)	126,75
--	-----	--------

Abertura dos Peneiros (mm)	Massa Retida m_x (g)	% Retida $n'_x = m_x / m_b * 100$ (%)	% Retida Acumulada N'_x (%)	% Acumulad. Passados $n''_x = 100 - N'_x$ (%)	% Acumulados Passados $N''_x = n''_x * (100 - N'_{10}) / 100$ (%)
0,841	17,30	13,65	13,65	86,35	81,38
0,420	21,52	16,98	30,63	69,37	65,37
0,250	15,35	12,11	42,74	57,26	53,96
0,105	16,65	13,14	55,88	44,12	41,58
0,074	6,46	5,10	60,98	39,02	36,77



CICCOPI - LGMC - Rua de Espinhosa - 4475-699 Avioso S. Pedro - Maia | T229866448 | F229866498 | lgmc@ciccopi.pt | www.ciccopi.pt

PS005

02/12/2008 15:50



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2008510120086885

DATA: 2008-12-02

PÁGINA: 3/4

C - Correção do menisco

Número do densímetro / Número da Proveta	L0864/L0930
C _M - Correção do menisco	0,001

D - Correção do antifloculante

T - Temperatura	(°C)	20
C _T - Correção da temperatura T		0,0000
L _A - Leitura do densímetro à temperatura T		1,000
C _A - Correção do antifloculante = L _A - 1,000 + C _T		0,0000

E - Densidade das partículas

G - Densidade das partículas	2,68
------------------------------	------

F - Sedimentação

Data	2008-11-26	2008-11-26	2008-11-26	2008-11-26	2008-11-26	2008-11-26	2008-11-26	2008-11-27	2008-11-28
Hora (h:m)	11:48:00	11:49:00	11:52:00	12:02:00	12:17:00	12:47:00	15:57:00	11:47:00	11:47:00
t - (min)	1	2	5	15	30	60	250	1440	2880
L _s - (g/ml)	1,029	1,028	1,025	1,021	1,018	1,016	1,010	1,004	1,003
T - (°C)	17	17	17	17	17	18	18	17	17
C _T	-0,0005	-0,0005	-0,0005	-0,0005	-0,0005	-0,0003	-0,0003	-0,0005	-0,0005
L _c - (g/ml)	1,0295	1,0285	1,0255	1,0215	1,0185	1,0167	1,0107	1,0045	1,0035
N _d - (%)	37,128	35,869	32,094	27,059	23,284	21,018	13,467	5,664	4,405
N _b - (%)	34,99	33,80	30,25	25,50	21,94	19,81	12,69	5,34	4,15
K ₂₀	0,014065	0,014065	0,014065	0,014065	0,014065	0,013885	0,013885	0,014065	0,014065
Z - (cm)	15,45	15,57	15,95	16,40	16,76	17,00	17,71	18,42	18,54
D - (mm)	0,0554	0,0393	0,0252	0,0147	0,0105	0,0074	0,0037	0,0016	0,0011

t - Intervalo de tempo decorrido entre o início do ensaio e a leitura respectiva

L_s - Leitura directa feita na parte superior do menisco do densímetro

T - Temperatura da suspensão

C_T - Correção da temperatura

L_c - Leituras do densímetro corrigidas = L_s + C_M - C_A + C_T

n_d - Percentagem de partículas de diâmetro inferior a D, referida à massa seca do solo utilizado = $\frac{100000}{m_b} \cdot \left[\frac{G}{(G-1)} \right] \cdot (L_c - 1)$

N_b - Percentagem de partículas de diâmetro inferior a D, referida à massa total da amostra = $n_d \cdot \left[\frac{100 - N_{10}}{100} \right]$

K₂₀ - Constante da lei de Stokes

Z - Profundidade correspondente às leituras L_s

D - Diâmetro das partículas correspondentes às % de n_d e N_b = $K \cdot \sqrt{(Z/t)}$ (mm)



CICCOPI - LGMC - Rua de Espinosa - 4475-699 Avioso S. Pedro - Maia | T229866448 | F229866498 | lgmc@ciccopi.pt | www.ciccopi.pt

PS005

02/12/2008 15:50

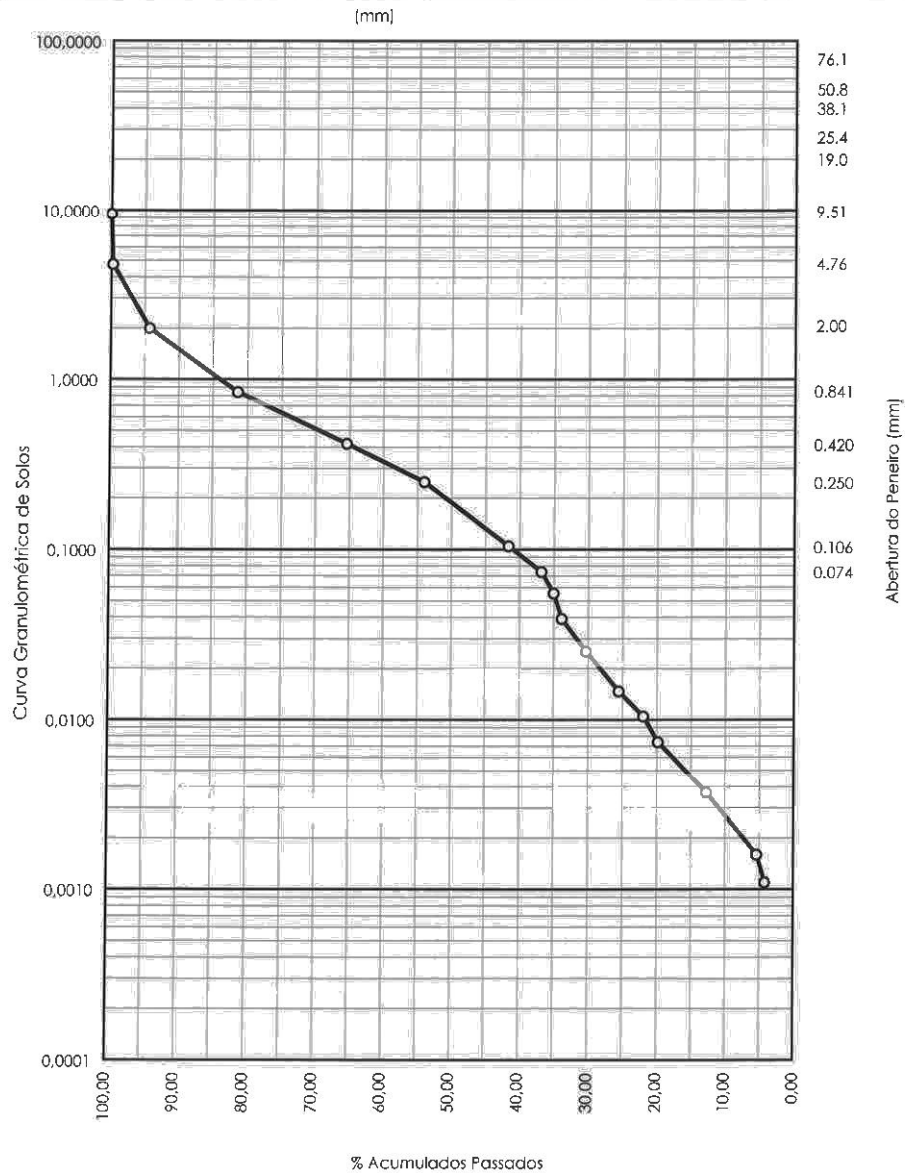


RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2008510120086885

DATA: 2008-12-02

PÁGINA: 4/4



CICCOPI - LGMC - Rua de Espinhosa - 4475-699 Avisos S. Pedro - Maia | T229866448 | F229866498 | lgmc@ciccopi.pt | www.ciccopi.pt

PS005

2008-12-02 15:50



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2008510120086886

DATA: 2008-12-02

PÁGINA: 1/2

ENSAIO REALIZADO:

Determinação da Densidade das Partículas
Norma Portuguesa NP 83/1965

REFERÊNCIA DA AMOSTRA:

Amostra apresentada pelo requerente, Solo residual granítico

DATA DE RECEPÇÃO DA AMOSTRA :

2008-11-24

CLIENTE :

ISEP
Rua Dr. Bernardino de Almeida, n.º 431
4200-485 Porto

OBRA :

Projecto

OBSERVAÇÕES:

O presente relatório diz respeito exclusivamente aos itens ensaiados e só pode ser reproduzido na íntegra, excepto quando haja autorização expressa do LGMC

RESPONSÁVEL PELO SECTOR

Eduardo Neves, Eng.º

O DIRECTOR TÉCNICO DO LGMC

Adriano Teixeira, Eng.º



CICCOPN - LGMC - Rua de Espinhosa - 4475-699 Avioso S. Pedro - Maia | T 229866448 | F 229866498 | lgmc@ciccopn.pt | www.ciccopn.pt

PS002

02/12/2008 15:38



Laboratório de Geotecnia e
Materiais de Construção



L0154
Ensaios

RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2008510120086886

DATA: 2008-12-02

PÁGINA: 2/2

Percentagem de material passado no peneiro de 4,76 mm de abertura (%)	99,77	
Modo de realização do ensaio	Com Secagem Prévia	Com Secagem Prévia
Referência do provete	1	2
Número do picnómetro	184	104
m ₁ - Massa do picnómetro (g)	54,16	51,51
m ₂ - Massa do picnómetro com água à temperatura t ₁ (g)	153,90	150,89
t ₁ - Temperatura da água na calibração (°C)	18,1	22,0
d _{t1} - Densidade da água à temperatura t ₁	0,99860	0,99780
t _x - Temperatura da água no ensaio (°C)	15,7	16,1
d _{t_x} - Densidade da água à temperatura t _x	0,99902	0,99895
m ₃ - Massa do picnómetro com água à temperatura t _x = (d _{t_x} / d _{t1}) * (m ₂ - m ₁) + m ₁ (g)	153,94	151,01
m ₄ - Massa do provete seco (g)	26,7	27,02
m ₅ - Massa do picnómetro, com água e provete (g)	170,63	167,96
d _{t20} - Densidade da água à temperatura de 20 °C	0,99823	
K - Coeficiente de correcção = d _{t_x} / d _{t20}	1,001	1,001
Densidade das partículas do provete = m ₄ / (m ₃ - m ₄) * K	2,67	2,69
Densidade das partículas = valor médio	2,68	



CICCOPI - LGMC - Rua de Espinhosa - 4475-699 Avioso S. Pedro - Maia | T 229866448 | F 229866498 | l g m c @ c i c c o p i . p t | w w w . c i c c o p i . p t

02/12/2008 15:38



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2012103620121236

DATA: 2012-05-08

PÁGINA: 1/3

ENSAIO REALIZADO:

Determinação da Permeabilidade - Carga Variável
Procedimento Interno de Ensaio PIE 11/2/2008; Norma Americana ASTM D 2435/2004

REFERÊNCIA DA AMOSTRA:

Amostra apresentada pelo requerente: Granito

DATA DE RECEPÇÃO DA AMOSTRA :

2012-04-30

CLIENTE :

ISEP
Rua Dr. Bernardino de Almada, nº 431
4200 485 Porto

OBRA :

Doutoramento

OBSERVAÇÕES:

Teor em água após ensaio = 46,4%. Os valores de remoldagem da amostra foram indicados pelo requerente.

O presente relatório diz respeito exclusivamente aos itens ensaiados e só pode ser reproduzido na íntegra, excepto quando haja autorização expressa do LGMC

RESPONSÁVEL PELO SECTOR

Eduardo Neves, Eng^o

O DIRECTOR TÉCNICO DO LGMC


Maia, Portugal
Data da Assinatura: 30/05/2012 22:12:18

Adriano Teixeira, Eng^o



CICCOPN - LGMC Rua de Espinhosa 4475-699 Avioso S. Pedro-Maia | T229866448 | F220400835 | lgmc@ciccopn.pt | www.ciccopn.pt

P9328

11/05/2012 15:24



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2012103620121236

DATA: 2012-05-08

PÁGINA: 2/3

Data de ensaio	2012-05-08
----------------	------------

A. Características do equipamento

Edómetro nº		1
A - Área da secção do anel	(cm²)	38,54
E - Espessura da amostra	(cm)	1,886
V - Volume da amostra = (A*E)	(cm³)	72,69
a - Área da secção transversal dos tubos de alimentação	(cm²)	0,6448
Equipamento de leitura		Régua graduada
Referência do equipamento de leitura		L1152
r _L - Resolução do equipamento de leitura	(cm)	0,1

B. Características da amostra

Características da amostra		Solo areno-siltoso
Tipo de amostra		Remoldada
B _d - Baridade seca	(g/cm³)	1,06
w - Teor em água	(%)	1,0
Recolha da amostra		---
Data de recolha da amostra		2012-04-30
Tubo amostrador		---
Diâmetro externo do tubo amostrador	(mm)	---
Diâmetro interno do tubo amostrador	(mm)	---
Profundidade de recolha da amostra	(m)	---
Nível freático	(m)	---



Rua de Espinhosa 4475-699 Avioso S. Pedro-Maia | T229866448 | F220400835 | lgmc@ciccopn.pt | www.ciccopn.pt

P9328

11/05/2012 15:24



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2012103620121236

DATA: 2012-05-08

PÁGINA: 3/3

Leituras (mm)	h_1 – Carga hidráulica a inicial (mm)	h_2 – Carga hidráulica a final (mm)	t – Intervalo de tempo entre leituras (s)	K_i – Coeficiente de permeabilidade $= (a^2 E / A^2 t) \cdot \ln(h_1/h_2)$ (cm/s)	T – Temperatur a da água no ensaio (°C)	η/η_{20} – Factor de correcção da viscosidade da água	K_{20} – Coeficiente de permeabilidade para $T=20^\circ\text{C}$ $= K_i \cdot (\eta/\eta_{20})$ (cm/s)
1495,0	1495,0	1325,0	5	7,6181E-04	17,1	1,0776	8,21E-04
1325,0	1325,0	1175,0	5	7,5821E-04	17,1	1,0776	8,17E-04
1175,0	1175,0	1045,0	5	7,3995E-04	17,1	1,0776	7,97E-04
1045,0	1045,0	925,0	5	7,6979E-04	17,1	1,0776	8,30E-04
925,0	925,0	825,0	5	7,2203E-04	17,1	1,0776	7,78E-04
825,0	825,0	740,0	5	6,8620E-04	17,1	1,0776	7,39E-04
740,0	740,0	660,0	5	7,2203E-04	17,1	1,0776	7,78E-04
660,0	660,0	590,0	5	7,0755E-04	17,1	1,0776	7,62E-04
590,0	590,0	525,0	5	7,3663E-04	17,1	1,0776	7,94E-04
525,0	525,0	---	--	---	---	---	---

σ - Tensão normal instalada	(MPa)	0,000
Coeficiente de permeabilidade para a temperatura igual a 20°C = média K_{20}	(cm/s)	7,91E-04

Caracterização geotécnica do calcário:



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 20112562011413

DATA: 2011-01-28

PÁGINA: 1/2

ENSAIO REALIZADO:

Preparação por via Seca de Amostras para Ensaio de Identificação
Especificação do LNEC E 195/1966

REFERÊNCIA DA AMOSTRA:

Amostra apresentada pelo requerente. Cm1 MMC-ISEP

DATA DE RECEÇÃO DA AMOSTRA :

2011-01-14

CLIENTE :

ISEP
Rua Dr. Bernardino de Almida, n.º 431
4200 485 Porto

OBRA :

Doutoramento

OBSERVAÇÕES:

O presente relatório diz respeito exclusivamente aos itens ensaiados e só pode ser reproduzido na íntegra, exceto quando haja autorização expressa do LGMC

RESPONSÁVEL PELO SETOR

1.º DIRECTOR TÉCNICO DO LGMC

Eduardo Neves, Eng.º

Adriano Teixeira, Eng.º



CICCOPI - LGMC - Rua de Espinhosa - 4475-699 Avioso S. Pedro - Maia | T229666448 | F229666498 | lgmc@ciccopi.pt | www.ciccopi.pt

PS010

28/01/2011 10:04



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 20112562011413

DATA: 2011-01-28

PÁGINA: 2/2

Processo utilizado na secagem da amostra		Ao Ar
Método utilizado na selecção da amostra		Esquartelamento
m ₁ - Massa da amostra seleccionada (g)		216,9
Diâmetro nominal das maiores partículas (mm)		4,76
m ₂ - Massa do material retido no peneiro de 2,00 mm de abertura (g)		44,14
m ₃ - Massa do material passado no peneiro de 2,00 mm de abertura (g)		167,68
m ₄ - Massa do material passado no peneiro de 0,420 mm de abertura (g)	



CICCOPI - LGMC - Rua de Espinhoso - 4475-699 Avioso S. Pedro - Maia | T229866448 | F229866498 | lgmc@ciccopi.pt | www.ciccopi.pt

PS010

28/01/2011 10:04



Laboratório de Geotecnia e
Materiais de Construção



acreditação

L0154
Ensaios

RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 20112532011386

DATA: 2011-01-27

PÁGINA: 1/4

ENSAIO REALIZADO:

Análise Granulométrica

Especificação do LNEC E 196/1966

REFERÊNCIA DA AMOSTRA:

Amostra apresentada pelo requerente. Cm1 MMC-ISEP

DATA DE RECEPÇÃO DA AMOSTRA :

2011-01-14

CLIENTE :

ISEP

Rua Dr. Bernardino de Almeida, nº 431

4200 485 Porto

OBRA :

Doutoramento

OBSERVAÇÕES:

O presente relatório diz respeito exclusivamente aos itens ensaiados e só pode ser reproduzido na íntegra, excepto quando haja autorização expressa do LGMCM

RESPONSÁVEL PELO SECTOR

DIRECTOR TÉCNICO DO LGMCM

Eduardo Neves, Engº

Adriano Teixeira, Engº



CICCOPI - LGMCM - Rua de Espinhosa - 4475-699 Avioso S. Pedro - Maia | T 229866448 | F 229866498 | lgmcm@ciccopi.pt | www.ciccopi.pt

FS005

28/01/2011 12:37



Laboratório de Geotecnia e
Materiais de Construção



acreditação

L0154
Ensaios

RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 20112532011386

DATA: 2011-01-27

PÁGINA: 2/4

m'_t - Massa total da amostra seca ao ar	(g)	216,9
m_{10} - Massa total da fracção retida no peneiro 2,00 mm	(g)	42,86
W_a - Teor em água do material passado no peneiro 2,00 mm	(%)	2,40
m_t - Massa total da amostra = $m_{10} + [(m'_t - m_{10}) * 100 / (100 + W_a)]$	(g)	212,82
N'_{10} - Percentagem de material grosso = $m_{10} / m_t * 100$	(%)	20,14

A - Material grosso (retido no peneiro de 2,00 mm de abertura)

Abertura dos Peneiros (mm)	Massa Retida m_x (g)	% Retida $N_x = 100 * m_x / m_t$ (%)	% Retida Acumulada N'_x (%)	% Acumulados Passados $N''_x = 100 - N'_x$ (%)
76,1	0,00	0,00	0,00	100,00
50,8	0,00	0,00	0,00	100,00
38,1	0,00	0,00	0,00	100,00
25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
9,51	0,00	0,00	0,00	100,00
4,76	0,4949	0,23	0,23	99,77
2,00	42,3605	19,90	20,14	79,86

B. Material fino (passado no peneiro de 2,00 mm de abertura)

m_a - Massa de solo seco ao ar utilizada	(g)	125,93
--	-----	--------

B1. Com pré-tratamento

Solução utilizada no pré-tratamento	
m_b - Massa do solo seco após pré-tratamento	(g)
N_p - Perda no pré-tratamento = $100 - (m_b * (100 + W_a) / m_a)$	(%)

B2. Sem pré-tratamento

m_b - Massa do material fino utilizado = $m_a * 100 / (100 + W_a)$	(g)	122,98
--	-----	--------

Abertura dos Peneiros (mm)	Massa Retida m_x (g)	% Retida $n'_x = m_x / m_b * 100$ (%)	% Retida Acumulada N'_x (%)	% Acumulad. Passados $n''_x = 100 - N'_x$ (%)	% Acumulados Passados $N''_x = n''_x * (100 - N'_{10}) / 100$ (%)
0,841	21,5087	17,49	17,49	82,51	65,89
0,420	14,8378	12,07	29,56	70,44	56,25
0,250	6,0528	4,92	34,48	65,52	52,32
0,105	6,2861	5,11	39,59	60,41	48,24
0,074	2,2472	1,83	41,42	58,58	46,78



CICCOPI - LGMCM - Rua de Espinosa - 4475-699 Aviação S. Pedro - Maia | T 229866448 | F 229866498 | lgm@cccopi.pt | www.cccopi.pt

PS005

26/01/2011 12:37



Laboratório de Geotecnia e
Materiais de Construção



acreditação

L0154
Ensaios

RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 20112532011386

DATA: 2011-01-27

PÁGINA: 3/4

C - Correção do menisco

Número do densímetro / Número da Proveta	L1492/L928
C _M - Correção do menisco	0,001

D - Correção do antifloculante

T - Temperatura	(°C)	20
C _T - Correção da temperatura T		0,0000
L _A - Leitura do densímetro à temperatura T		1,000
C _A - Correção do antifloculante = L _A - 1,000 + C _T		0,0000

E - Densidade das partículas

G - Densidade das partículas	2,73
------------------------------	------

F - Sedimentação

Data	2011-01-26	2011-01-26	2011-01-26	2011-01-26	2011-01-26	2011-01-26	2011-01-26	2011-01-27	2011-01-28
Hora (h:m)	10:46:11	10:47:11	10:50:11	11:00:11	11:15:11	11:45:11	16:44:11	11:10:11	11:43:11
t _e (min)	1	2	5	15	30	60	250	1440	2910
L _s (g/ml)	1,042	1,040	1,036	1,031	1,028	1,025	1,017	1,012	1,010
T (°C)	19	19	19	19	19	19	19	18	19
C _T	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0003	-0,0002
L _c (g/ml)	1,0428	1,0408	1,0368	1,0318	1,0288	1,0258	1,0178	1,0127	1,0108
N _d (%)	54,919	52,353	47,220	40,805	36,955	33,106	22,840	16,296	13,858
N _D (%)	43,86	41,81	37,71	32,59	29,51	26,44	18,24	13,01	11,07
K	0,01348	0,01348	0,01348	0,01348	0,01348	0,01348	0,01348	0,01365	0,01348
Z (cm)	13,06	13,27	13,68	14,20	14,51	14,82	15,65	16,17	16,38
D (mm)	0,0488	0,0348	0,0223	0,0131	0,0094	0,0067	0,0034	0,0014	0,0010

t_e - Intervalo de tempo decorrido entre o início do ensaio e a leitura respectiva

L_s - Leitura directa feita na parte superior do menisco do densímetro

T - Temperatura da suspensão

C_T - Correção da temperatura

L_c - Leituras do densímetro corrigidas= L_s + C_M - C_A + C_T

n_d - Percentagem de partículas de diâmetro inferior a D, referida à massa seca do solo utilizado= $\left[\frac{100000}{m_b} \right] * \left[\frac{G}{(G-1)} \right] * (L_c - 1)$

N_D - Percentagem de partículas de diâmetro inferior a D, referida à massa total da amostra = $n_d * \left[\frac{100 - N_{10}}{100} \right]$

K - Constante da lei de Stokes

Z - Profundidade correspondente às leituras L_s

D - Diâmetro das partículas correspondentes às % de n_d e N_D = $K * \sqrt{Z / t}$ (mm)



CICCOPI - LGMC - Rua de Espinhosa - 4475-699 Aviação S. Pedro - Maia | T 229866448 | F 229866498 | lgmc@ciccopi.pt | www.ciccopi.pt

PS005

28/01/2011 12:37



Laboratório de Geotecnia e
Materiais de Construção



acreditação

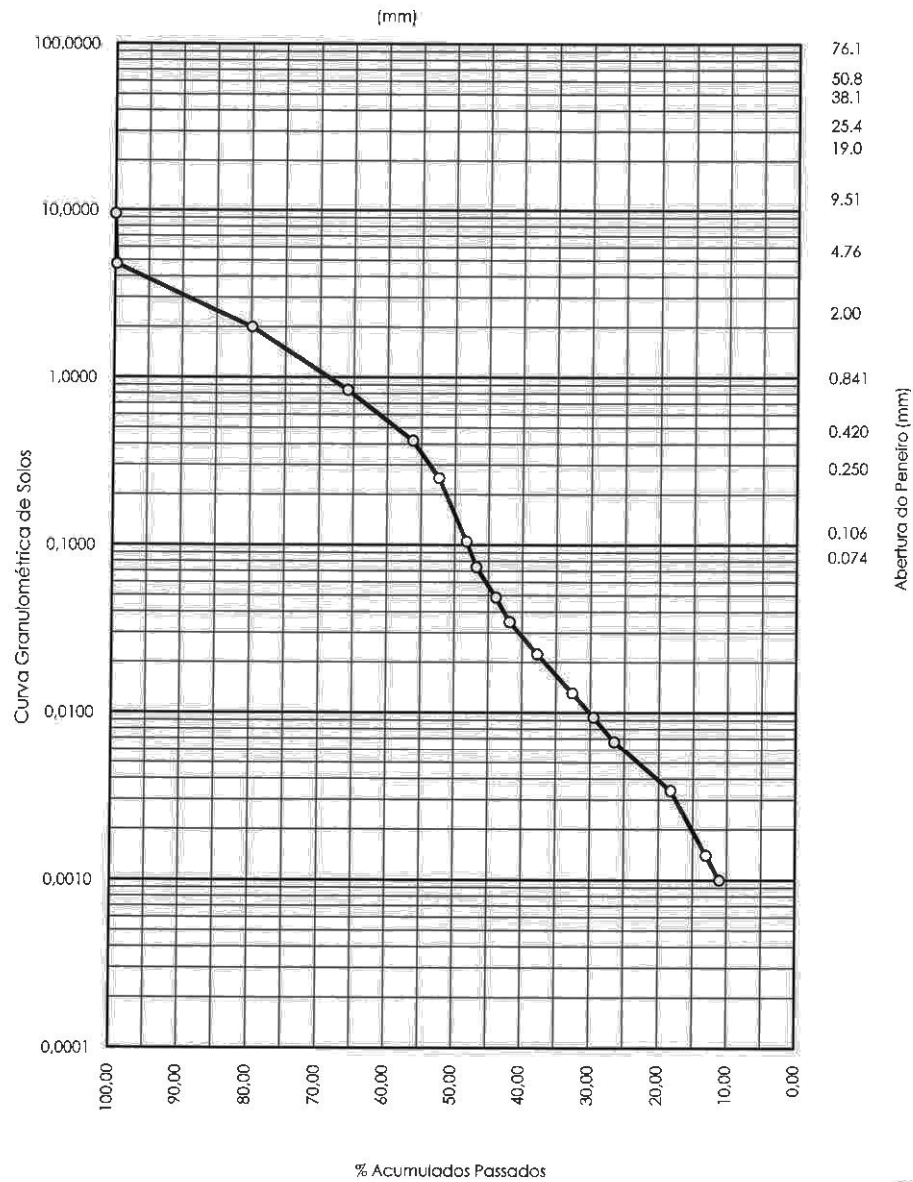
L0154
Ensaios

RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 20112532011386

DATA: 2011-01-27

PÁGINA: 4/4



CICCO PN - LGMC - Rua de Espinhosa - 4475-699 Avioso S. Pedro - Maia | T229866448 | F229866498 | lgmc@ciccopn.pt | www.ciccopn.pt

FS005

2011-01-28 12:37



Laboratório de Geotecnia e
Materiais de Construção



acreditação

L0154
Ensaíos

RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 20112542011387

DATA: 2011-01-27

PÁGINA: 1/2

ENSAIO REALIZADO:

Determinação da Densidade das Partículas

Norma Portuguesa NP 83/1965

REFERÊNCIA DA AMOSTRA:

Amostra apresentada pelo requerente. Cm1 MMC-ISEP

DATA DE RECEPÇÃO DA AMOSTRA :

2011-01-14

CLIENTE :

ISEP

Rua Dr. Bernardino de Almeida, nº 431

4200 485 Porto

OBRA :

Doutoramento

OBSERVAÇÕES:

O presente relatório diz respeito exclusivamente aos itens ensaiados e só pode ser reproduzido na íntegra, exceto quando haja autorização expressa do LGMC.

RESPONSÁVEL PELO SECTOR

1.º DIRECTOR TÉCNICO DO LGMC

Eduardo Neves, Engº

Adriano Teixeira, Engº



CICCOPI - LGMC - Rua de Espinhosa - 4475-699 Avioso S. Pedro - Maia | T 229866448 | F 229866496 | lgm@ciccopi.pt | www.ciccopi.pt

PS002

28/01/2011 12:30



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 20112542011387

DATA: 2011-01-27

PÁGINA: 2/2

Porcentagem de material passado no peneiro de 4,76 mm de abertura	(%)	99,77	
Modo de realização do ensaio		Com Secagem Prévia	Com Secagem Prévia
Referência do provete		1	2
Número do picnómetro		109	107
m ₁ - Massa do picnómetro	(g)	76,00	67,66
m ₂ - Massa do picnómetro com água à temperatura t ₁	(g)	174,21	166,09
t ₁ - Temperatura da água na calibração	(°C)	23,5	23,5
d _{t1} - Densidade da água à temperatura t ₁		0,99745	0,99745
t _x - Temperatura da água no ensaio	(°C)	16,1	16,9
d _{t_x} - Densidade da água à temperatura t _x		0,99895	0,99882
m ₃ - Massa do picnómetro com água à temperatura t _x = (d _{t_x} / d _{t1}) * (m ₂ - m ₁) + m ₁	(g)	174,37	166,23
m ₄ - Massa do provete seco	(g)	26,9069	26,8413
m ₅ - Massa do picnómetro, com água e provete	(g)	191,3962	183,2188
d _{t20} - Densidade da água à temperatura de 20 °C		0,99823	
K - Coeficiente de correcção = d _{t_x} / d _{t20}		1,001	1,001
Densidade das partículas do provete = m ₄ / [(m ₃ - m ₄) * K]		2,73	2,73
Densidade das partículas = valor médio		2,73	



CICCOPN - LGMC - Rua de Espinhosa - 4475-699 Avioso S. Pedro - Maia | T 229866448 | F 229866498 | lgmc@ciccopn.pt | www.ciccopn.pt

PS002

28/01/2011 12:30



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2012103620121253

DATA: 2012-05-09

PÁGINA: 1/3

ENSAIO REALIZADO:

Determinação da Permeabilidade - Carga Variável
Procedimento Interno de Ensaio PIE 11/2/2008; Norma Americana ASTM D 2435/2004

REFERÊNCIA DA AMOSTRA:

Amostra apresentada pelo requerente, Calcário

DATA DE RECEPÇÃO DA AMOSTRA :

2012-04-30

CLIENTE :

ISEP
Rua Dr. Bernardino de Almada, nº 431
4200 485 Porto

OBRA :

Doutoramento

OBSERVAÇÕES:

Teor em água após ensaio = 20,6%. Os valores de remoldagem da amostra foram indicados pelo requerente.

O presente relatório diz respeito exclusivamente aos itens ensaiados e só pode ser reproduzido na íntegra, excepto quando haja autorização expressa do LGMC

RESPONSÁVEL PELO SECTOR

O DIRECTOR TÉCNICO DO LGMC

Eduardo Neves, Eng^o


Maia, Portugal
Data da Assinatura: 30/05/2012 22:18:04

Adriano Teixeira, Eng^o



CICCOPN - LGMC Rua de Espinhosa 4475-699 Avioso S. Pedro-Maia | T229866448 | F220400835 | lgmc@ciccopn.pt | www.ciccopn.pt

P9328

15/05/2012 09:36



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2012103620121253

DATA: 2012-05-09

PÁGINA: 2/3

Data de ensaio	2012-05-09
----------------	------------

A. Características do equipamento

Edómetro nº		3
A - Área da secção do anel	(cm²)	38,33
E - Espessura da amostra	(cm)	1,875
V - Volume da amostra = (A*E)	(cm³)	71,87
a - Área da secção transversal dos tubos de alimentação	(cm²)	0,6448
Equipamento de leitura		Régua graduada
Referência do equipamento de leitura		L1152
r _L - Resolução do equipamento de leitura	(cm)	0,1

B. Características da amostra

Características da amostra		Solo areno-siltoso
Tipo de amostra		Remoldada
B _d - Baridade seca	(g/cm³)	1,53
w - Teor em água	(%)	1,5
Recolha da amostra		---
Data de recolha da amostra		2012-04-30
Tubo amostrador		---
Diâmetro externo do tubo amostrador	(mm)	---
Diâmetro interno do tubo amostrador	(mm)	---
Profundidade de recolha da amostra	(m)	---
Nível freático	(m)	---



P3228

Rua de Espinhosa 4475-699 Avioso S. Pedro-Maia | T229866448 | F220400835 | lgmc@ciccopn.pt | www.ciccopn.pt

15/05/2012 09:36



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2012103620121253

DATA: 2012-05-09

PÁGINA: 3/3

Leituras (mm)	h_1 – Carga hidráulica a inicial (mm)	h_2 – Carga hidráulica a final (mm)	t – Intervalo de tempo entre leituras (s)	K_i – Coeficiente de permeabilidade $= (a^2 E / A^2 t) \cdot \ln(h_1/h_2)$ (cm/s)	T – Temperatur a da água no ensaio (°C)	η/η_{20} – Factor de correcção da viscosidade da água	K_{20} – Coeficiente de permeabilidade para $T=20^\circ\text{C}$ $= K_i \cdot (\eta/\eta_{20})$ (cm/s)
1495,0	1495,0	1335,0	5	7,1408E-04	18,3	1,0507	7,50E-04
1335,0	1335,0	1190,0	5	7,2532E-04	18,3	1,0507	7,62E-04
1190,0	1190,0	1060,0	5	7,2978E-04	18,3	1,0507	7,67E-04
1060,0	1060,0	955,0	5	6,5804E-04	18,3	1,0507	6,91E-04
955,0	955,0	850,0	5	7,3477E-04	18,3	1,0507	7,72E-04
850,0	850,0	760,0	5	7,0602E-04	18,3	1,0507	7,42E-04
760,0	760,0	670,0	5	7,9511E-04	18,3	1,0507	8,35E-04
670,0	670,0	600,0	5	6,9612E-04	18,3	1,0507	7,31E-04
600,0	600,0	535,0	5	7,2334E-04	18,3	1,0507	7,60E-04
535,0	535,0	---	---	---	---	---	---

σ - Tensão normal instalada	(MPa)	0,000
Coeficiente de permeabilidade para a temperatura igual a 20°C = média K_{20}	(cm/s)	7,57E-04

Caracterização geotécnica do xisto:



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2011345620113759

DATA: 2011-08-04

PÁGINA: 1/2

ENSAIO REALIZADO:

Preparação por via Seca de Amostras para Ensaios de Identificação
Especificação do LNEC E 195/1966

REFERÊNCIA DA AMOSTRA:

Amostra apresentada pelo requerente. Material xistoso

DATA DE RECEÇÃO DA AMOSTRA :

2011-07-29

CLIENTE :

ISEP
Rua Dr. Bernardino de Almeida, n.º 431
4200 485 Porto

OBRA :

Doutoramento

OBSERVAÇÕES:

O presente relatório diz respeito exclusivamente aos ensaios realizados e só pode ser reproduzido na íntegra, excepto quando haja autorização expressa do LGMC

RESPONSÁVEL PELO SECTOR

O DIRECTOR TÉCNICO DO LGMC

Eduardo Neves, Eng.º


Adriano Teixeira, E
Data de Assinatura: 10/08/2011 16:12:50



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO N°: 2011345620113759

DATA: 2011-08-04

PÁGINA: 2/2

Processo utilizado na secagem da amostra		Ao Ar
Método utilizado na selecção da amostra		Esquartelamento
m ₁ - Massa da amostra seleccionada (g)		128,19
Diâmetro nominal das maiores partículas (mm)		0,841
m ₂ - Massa do material retido no peneiro de 2,00 mm de abertura (g)		0,0
m ₃ - Massa do material passado no peneiro de 2,00 mm de abertura (g)		127,76
m ₄ - Massa do material passado no peneiro de 0,420 mm de abertura (g)		---



Laboratório de Geotecnia e
Materiais de Construção



accreditação

L0154
Ensaíos

RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2011345720113765

DATA: 2011-08-04

PÁGINA: 1/4

ENSAIO REALIZADO:

Análise Granulométrica

Especificação do LNEC E 196/1966

REFERÊNCIA DA AMOSTRA:

Amostra apresentada pelo requerente. Material xistoso

DATA DE RECEPÇÃO DA AMOSTRA :

2011-07-29

CLIENTE :

ISEP

Rua Dr. Bernardino de Almeida, n.º 431

4200 485 Porto

OBRA :

Doutoramento

OBSERVAÇÕES:

O presente relatório diz respeito exclusivamente aos itens ensaiados e só pode ser reproduzido na íntegra, excepto quando haja autorização expressa do LGMC.

RESPONSÁVEL PELO SECTOR

O DIRECTOR TÉCNICO DO LGMC

Eduardo Neves, Eng.º

Adriano Teixeira, Eng.º



CICCOPI - LGMC - Rua de Espinhosa - 4475-699 Avioso S. Pedro - Maia | T 229866448 | F 229866496 | lgmc@ciccopi.pt | www.ciccopi.pt

P5005

10/08/2011 14:44



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2011345720113765

DATA: 2011-08-04

PÁGINA: 2/4

m_T - Massa total da amostra seca ao ar	(g)	128,19
m_{10} - Massa total da fracção retida no peneiro 2,00 mm	(g)	0,0
W_o - Teor em água do material passado no peneiro 2,00 mm	(%)	0,34
m_t - Massa total da amostra = $m_{10} + [(m_T - m_{10}) * 100 / (100 + W_o)]$	(g)	127,76
N'_{10} - Percentagem de material grosso = $m_{10} / m_t * 100$	(%)	0,00

A - Material grosso (retido no peneiro de 2,00 mm de abertura)

Abertura dos Peneiros (mm)	Massa Retida m_x (g)	% Retida $N_x = 100 * m_x / m_t$ (%)	% Retida Acumulada N'_x (%)	% Acumulados Passados $N''_x = 100 - N'_x$ (%)
76,1	0,00	0,00	0,00	100,00
50,8	0,00	0,00	0,00	100,00
38,1	0,00	0,00	0,00	100,00
25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
9,51	0,00	0,00	0,00	100,00
4,76	0,00	0,00	0,00	100,00
2,00	0,00	0,00	0,00	100,00

B. Material fino (passado no peneiro de 2,00 mm de abertura)

m_a - Massa de solo seco ao ar utilizada	(g)	128,19
--	-----	--------

B1. Com pré-tratamento

Solução utilizada no pré-tratamento	
m_b - Massa do solo seco após pré-tratamento	(g)
N_p - Perda no pré-tratamento = $100 - (m_b * (100 + W_o) / m_a)$	(%)

B2. Sem pré-tratamento

m_b - Massa do material fino utilizado = $m_a * 100 / (100 + W_o)$	(g)	127,76
--	-----	--------

Abertura dos Peneiros (mm)	Massa Retida m_x (g)	% Retida $n'_x = m_x / m_b * 100$ (%)	% Retida Acumulada N'_x (%)	% Acumulad. Passados $n''_x = 100 - N'_x$ (%)	% Acumulados Passados $N''_x = n''_x * (100 - N'_{10}) / 100$ (%)
0,841	4,2016	3,29	3,29	96,71	96,71
0,420	3,4463	2,70	5,99	94,01	94,01
0,250	2,6997	2,11	8,10	91,90	91,90
0,105	4,3810	3,43	11,53	88,47	88,47
0,074	3,2830	2,57	14,10	85,90	85,90



CICCOPI - LGMC - Rua de Espinhosa - 4475-699 Avioso S. Pedro - Maia | T 229866448 | F 229866498 | lgmc@ciccopi.pt | www.ciccopi.pt

10/08/2011 14:44



Laboratório de Geotecnia e
Materiais de Construção



acreditação

L0154
Ensaios

RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2011345720113765

DATA: 2011-08-04

PÁGINA: 3/4

C - Correção do menisco

Número do densímetro / Número da Proveta	L1492/L930
C _M - Correção do menisco	0,001

D - Correção do antifloculante

T - Temperatura	[°C]	20
C _T - Correção da temperatura T		0,0000
L _A - Leitura do densímetro à temperatura T		1,000
C _A - Correção do antifloculante = L _A - 1,000 + C _T		0,0000

E - Densidade das partículas

G - Densidade das partículas	2,80
------------------------------	------

F - Sedimentação

Data	2011-08-01	2011-08-01	2011-08-01	2011-08-01	2011-08-01	2011-08-01	2011-08-01	2011-08-02	2011-08-03
Hora (h:m)	11:19:39	11:20:39	11:23:39	11:33:39	11:48:39	12:18:39	15:28:39	10:20:39	14:10:39
t - (min)	1	2	5	15	30	60	250	1440	2760
L _s - (g/ml)	1,056	1,051	1,040	1,023	1,013	1,007	1,002	1,001	1,001
T _s - (°C)	26	26	26	25	25	24	21	20	21
C _T -	0,0013	0,0013	0,0013	0,0010	0,0010	0,0008	0,0002	0,0000	0,0002
L _c - (g/ml)	1,0583	1,0533	1,0423	1,0250	1,0150	1,0088	1,0032	1,0020	1,0022
N _d - (%)	70,984	64,896	51,503	30,439	18,263	10,715	3,896	2,435	2,679
N _b - (%)	70,98	64,90	51,50	30,44	18,26	10,72	3,90	2,44	2,68
K -	0,01218	0,01218	0,01218	0,01232	0,01232	0,01246	0,01291	0,01307	0,01291
Z - (cm)	11,59	12,11	13,26	15,02	16,06	16,68	17,20	17,31	17,31
D - (mm)	0,0415	0,0300	0,0199	0,0123	0,0090	0,0066	0,0034	0,0014	0,0010

t - Intervalo de tempo decorrido entre o início do ensaio e a leitura respectiva

L_s - Leitura directa feita na parte superior do menisco do densímetro

T - Temperatura da suspensão

C_T - Correção da temperatura

L_c - Leituras do densímetro corrigidas = L_s + C_M - C_A + C_T

n_d - Percentagem de partículas de diâmetro inferior a D, referida à massa seca do solo utilizado = $\left[\frac{100000}{m_b} \right] \cdot \left[\frac{G}{(G - 1)} \right] \cdot (L_c - 1)$

N_b - Percentagem de partículas de diâmetro inferior a D, referida à massa total da amostra = $n_d \cdot \left[\frac{100 - N_{10}}{100} \right]$

K - Constante da lei de Stokes

Z - Profundidade correspondente às leituras L_s

D - Diâmetro das partículas correspondentes às % de n_d e N_b = $K \cdot \sqrt{Z/t}$ (mm)



CICCOPI - LGMC - Rua de Espinosa - 4475-699 Avioso S. Pedro - Maia | T 229866448 | F 229866498 | lgmc@ciccopi.pt | www.ciccopi.pt

PS005

10/08/2011 14:44

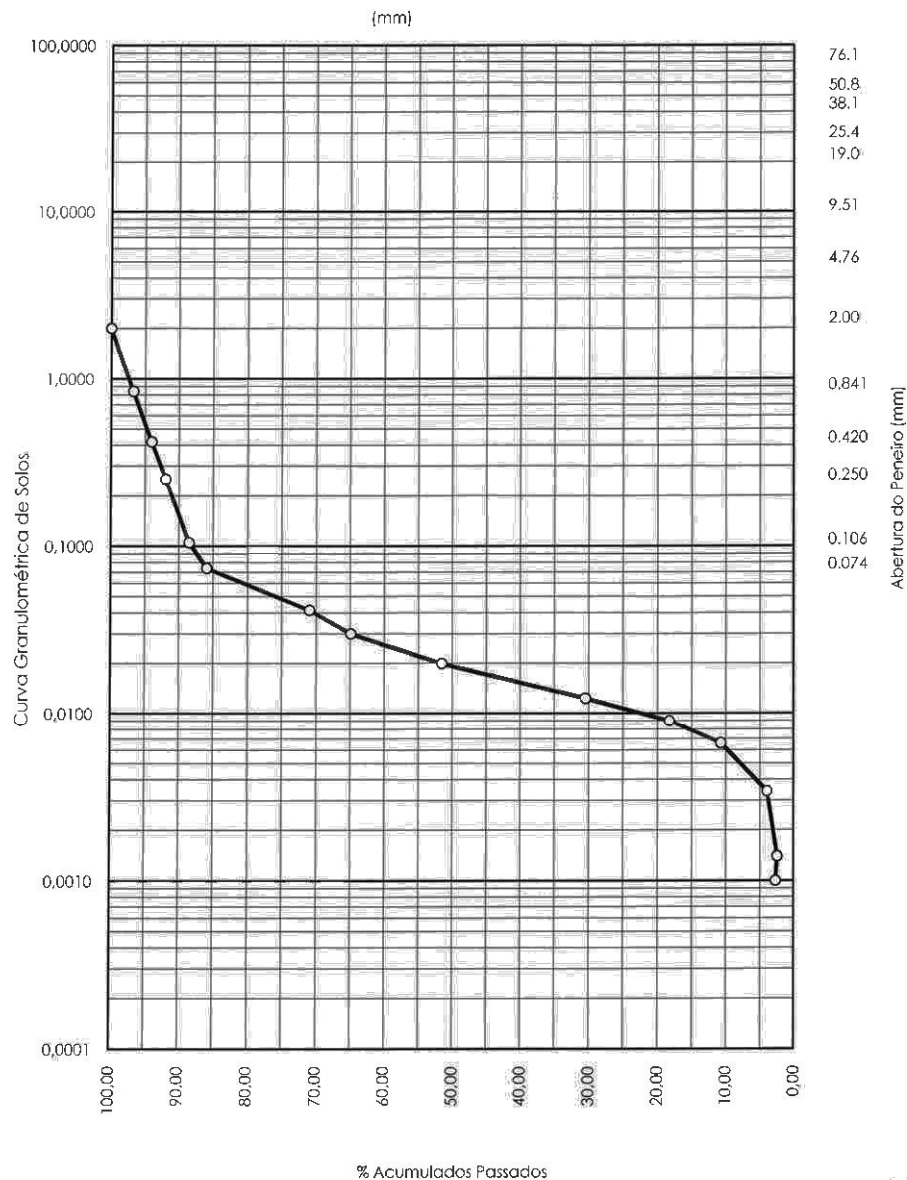


RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2011345720113765

DATA: 2011-08-04

PÁGINA: 4/4



CICCOPN • LGMC - Rua de Espinhosa - 4475-699 Avisos S.º Pedro - Maia | T229866448 | F229866498 | lgmc@ciccopn.pt | www.ciccopn.pt

2011-08-10 15:41



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2011345820113761

DATA: 2011-08-04

PÁGINA: 1/2

ENSAIO REALIZADO:

Determinação da Densidade das Partículas
Norma Portuguesa NP 83/1965

REFERÊNCIA DA AMOSTRA:

Amostra apresentada pelo requerente. Material xistoso

DATA DE RECEPÇÃO DA AMOSTRA :

2011-07-29

CLIENTE :

ISEP
Rua Dr. Bernardino de Almeida, n.º 431
4200 485 Porto

OBRA :

Doutoramento

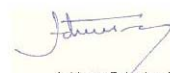
OBSERVAÇÕES:

O presente relatório diz respeito exclusivamente aos itens ensaiados e só pode ser reproduzido na íntegra, excepto quando haja autorização expressa do LGMCM

RESPONSÁVEL PELO SECTOR

O DIRECTOR TÉCNICO DO LGMCM

Eduardo Neves, Eng.º


Adriano Teixeira, E
Data de Assinatura: 10/08/2011 16:14:47



CICCO PN - LGMCM - Rua de Espinhosa - 4475-699 Aviação S. Pedro - Maia | T229866448 | F229866498 | lgmc@ciccopn.pt | www.ciccopn.pt

PSC02

04/08/2011 16:06



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2011345820113761

DATA: 2011-08-04

PÁGINA: 2/2

Percentagem de material passado no peneiro de 4,76 mm de abertura (%)	100	
Modo de realização do ensaio	Com Secagem Prévia	Com Secagem Prévia
Referência do provete	1	2
Número do picnómetro	109	103
m ₁ - Massa do picnómetro (g)	76,00	68,09
m ₂ - Massa do picnómetro com água à temperatura t ₁ (g)	174,21	166,35
t ₁ - Temperatura da água na calibração (°C)	23,5	23,9
dt ₁ - Densidade da água à temperatura t ₁	0,99745	0,99735
t _x - Temperatura da água no ensaio (°C)	24,5	24,5
dt _x - Densidade da água à temperatura t _x	0,99721	0,99721
m ₃ - Massa do picnómetro com água à temperatura t _x =(dt _x /dt ₁)*(m ₂ -m ₁)+m ₁ (g)	174,19	166,33
m ₄ - Massa do provete seco (g)	26,5342	27,0353
m ₅ - Massa do picnómetro, com água e provete (g)	191,2464	183,7109
dt ₂₀ - Densidade da água à temperatura de 20 °C	0,99823	
K - Coeficiente de correção = dt _x / dt ₂₀	0,999	0,999
Densidade das partículas do provete = m ₄ / (m ₃ -(m ₅ -m ₄))*K	2,80	2,80
Densidade das partículas = valor médio	2,80	



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2012103620121237

DATA: 2012-05-08

PÁGINA: 1/3

ENSAIO REALIZADO:

Determinação da Permeabilidade - Carga Variável
Procedimento Interno de Ensaio PIE 11/2/2008; Norma Americana ASTM D 2435/2004

REFERÊNCIA DA AMOSTRA:

Amostra apresentada pelo requerente. Xisto

DATA DE RECEPÇÃO DA AMOSTRA :

2012-04-30

CLIENTE :

ISEP
Rua Dr. Bernardino de Almada, nº 431
4200 485 Porto

OBRA :

Doutoramento

OBSERVAÇÕES:

Teor em água após ensaio = 21,0%. Os valores de remoldagem da amostra foram indicados pelo requerente.

O presente relatório diz respeito exclusivamente aos itens ensaiados e só pode ser reproduzido na íntegra, excepto quando haja autorização expressa do LGMC

RESPONSÁVEL PELO SECTOR

Eduardo Neves, Eng^o

O DIRECTOR TÉCNICO DO LGMC


Maia, Portugal
Data da Assinatura: 30/05/2012 22:16:36

Adriano Teixeira, Eng^o



CICCO PN - LGMC Rua de Espinhosa 4475-699 Avioso S. Pedro-Maia | T229866448 | F220400835 | lgmc@ciccopn.pt | www.ciccopn.pt

P9328

11/05/2012 15:23



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2012103620121237

DATA: 2012-05-08

PÁGINA: 2/3

Data de ensaio	2012-05-08
----------------	------------

A. Características do equipamento

Edómetro nº		2
A - Área da secção do anel	(cm²)	38,33
E - Espessura da amostra	(cm)	1,889
V - Volume da amostra = (A*E)	(cm³)	72,41
a - Área da secção transversal dos tubos de alimentação	(cm²)	0,6448
Equipamento de leitura		Régua graduada
Referência do equipamento de leitura		L1152
r _L - Resolução do equipamento de leitura	(cm)	0,1

B. Características da amostra

Características da amostra		Solo arenoso siltoso
Tipo de amostra		Remoldada
B _d - Baridade seca	(g/cm³)	1,48
w - Teor em água	(%)	0,4
Recolha da amostra		---
Data de recolha da amostra		2012-04-30
Tubo amostrador		---
Diâmetro externo do tubo amostrador	(mm)	---
Diâmetro interno do tubo amostrador	(mm)	---
Profundidade de recolha da amostra	(m)	---
Nível freático	(m)	---



Rua de Espinhosa 4475-699 Avioso S.Pedro-Maia | T229866448 | F220400835 | lgmc@ciccopn.pt | www.ciccopn.pt

P9328

11/05/2012 15:28



RELATÓRIO DE ENSAIO

DOCUMENTO Nº: 2012103620121237

DATA: 2012-05-08

PÁGINA: 3/3

Leituras (mm)	h_1 – Carga hidráulica a inicial (mm)	h_2 – Carga hidráulica a final (mm)	t – Intervalo de tempo entre leituras (s)	K_i – Coeficiente de permeabilidade $= (a^2 E / A^2 t) \cdot \ln(h_1/h_2)$ (cm/s)	T – Temperatur a da água no ensaio (°C)	η/η_{20} – Factor de correcção da viscosidade da água	K_{20} – Coeficiente de permeabilidade para $T=20^\circ\text{C}$ $= K_i \cdot (\eta/\eta_{20})$ (cm/s)
1495,0	1495,0	1305,0	5	8,6384E-04	17,1	1,0776	9,31E-04
1305,0	1305,0	1120,0	5	9,7157E-04	17,1	1,0776	1,05E-03
1120,0	1120,0	960,0	5	9,7968E-04	17,1	1,0776	1,06E-03
960,0	960,0	835,0	5	8,8658E-04	17,1	1,0776	9,55E-04
835,0	835,0	730,0	5	8,5408E-04	17,1	1,0776	9,20E-04
730,0	730,0	630,0	5	9,3630E-04	17,1	1,0776	1,01E-03
630,0	630,0	545,0	5	9,2110E-04	17,1	1,0776	9,93E-04
545,0	545,0	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---

σ - Tensão normal instalada	(MPa)	0,000
Coeficiente de permeabilidade para a temperatura igual a 20°C = média K_{20}	(cm/s)	9,88E-04

Caracterização química dos solos:



Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I.P.



L0196
Ensaios

LABORATÓRIO

BOLETIM DE ANÁLISE

Boletim

Boletim nº 42/FRX/2010
Página nº 1 de 1
Nº Ordem Lab 185/2010

Amostras 1 Amostra com referência: Sry1 (amostra de ensaio de bio-lixiviação)
Amostragem é da responsabilidade do Requerente

Requerente Departamento de Minas da FEUP/Eng.ª. Cristina Vila
Endereço FEUP – Rua Dr. Roberto Frias S/nº - 4200-465 PORTO

Req. 21.05.2010

Estudo Solicitado Análise de Elementos Maiores
Método Instrumental Dosagem de elementos Maiores/Fluorescência de Raios-X
Metodologia Método Interno - PA 003/FRX (2006-02-07)

Secção: Fluorescência de Raios-X
Amostras Chegadas à Secção: 02.06.2010
Data de Início da Análise: 11.06.2010

Registo: 180 FRX
Data de Início de Preparação: 09.06.2010
Data de Conclusão da Análise: 16.06.2010

(Resultados dados em %)

Elementos	Sry1
SiO ₂	50,72
Al ₂ O ₃	23,64
Fe total (Fe ₂ O ₃)	7,02
MnO	0,08
CaO	0,10
MgO	2,29
Na ₂ O	<0,20
K ₂ O	2,33
TiO ₂	1,50
P ₂ O ₅	0,21
P. Rubro	11,80

S. Mamede de Infesta, 21 de Junho de 2010

O Bolseiro Licenciado,

Rogério Calvo
Rogério Calvo

O Responsável pela Secção de FRX,

Maria Eugénia Moreira
Maria Eugénia Moreira
(Eng.ª Téc.)

Este Boletim não pode ser parcialmente reproduzido sem autorização por escrito dada pela Direcção do Laboratório.
Os resultados referem-se exclusivamente às amostras recebidas e ensaiadas. Qualquer extrapolação é da exclusiva responsabilidade do requerente.

RUA DA AMIEIRA - APARTADO 1089
4466-901 S. MAMEDE DE INFESTA

Tel. 351+229511915 - Fax 351+229514040
URL: www.ineti.pt

Nova Coleção 2000
Mod. nº 013

07FEV2006





UNIDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
MINERAL - LABORATÓRIO

BOLETIM DE ANÁLISE

Leilout

Boletim nº 48FRX/2011
Página nº 1 de 1
Nº Ordem Lab. 259/2011

Amostras 2 Amostras com referência: XT (Xisto do Marão) e CL (Calcário-marga da Pedreira de Souselas)
A amostragem é da responsabilidade do requerente

Requerente FEUP - Eng.ª Cristina Vila
Endereço FEUP- Rua Dr. Roberto Frias S/nº - 4200-465 PORTO

Req. Email: 28.07.2011

Estudo Solicitado Análise de Elementos Maiores
Método Instrumental Dosagem de elementos Maiores/Fluorescência de Raios-X
Metodologia Método Interno - PA 003/FRX (2010-10-15)

Sector: Fluorescência de Raios-X
Data de Início da Análise: 08-08-2011

Registo: 243 FRX e 244 FRX
Data de Conclusão da Análise: 12-08-2011

(Resultados dados em %)

Amostras		
Elementos	XT	CL
SiO ₂	59,43	11,14
Al ₂ O ₃	19,90	2,74
Fe total (Fe ₂ O ₃)	7,15	1,73
MnO	0,08	0,03
CaO	0,10	44,85
MgO	2,22	1,20
Na ₂ O	1,44	<0,20
K ₂ O	4,28	0,76
TiO ₂	0,89	0,12
P ₂ O ₅	0,09	0,07
P. Rubro	4,07	37,23

S. Mamede de Infesta, 22 de Setembro de 2011

O Responsável Técnico do Sector de FRX,

Rogério Calvo

Rogério Calvo
(Eng.º Químico)


Rua da Amieira, Apartado 1089
4466-901 S. MAMEDE DE INFESTA - Portugal
Tel: +351 229 490 000
Fax: +351 229 514 040
www.lneg.pt

Este Boletim não pode ser parcialmente reproduzido sem autorização por escrito dada pela Direcção de UCTM-Leb.
Os resultados referem-se exclusivamente às amostras recebidas e ensaiadas. Qualquer extrapolação é da exclusiva responsabilidade do requerente.

Colecção 2010
Mod. nº 013

15OUT2010

Caracterização mineralógica dos solos:



UNIDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
MINERAL - LABORATÓRIO

Liuhout

BOLETIM DE ANÁLISE

Boletim nº 01/RMIN/2013
Página nº 1 de 1
Nº Ordem Lab. 355/2012


Amostras	Material rochoso granulado A amostragem é da responsabilidade do requerente	
Requerente	FEUP/Dep Engenharia Minas/Prof. A. Fiúza	
Endereço	Rua Dr. Roberto Frias S/nº - 4200-465 PORTO	Req. Email: 05.12.2012
Estudo Solicitado	Análise mineralógica	
Método Instrumental	Difração de raios X	
Metodologia	PA118RMIN	
Sector: Caracterização de Minerais Não-Metálicos	Registo: 9556NM a 9561NM	
E Matérias-Primas Cerâmicas		
Data de Início da Análise: 14/12/2012	Data de Conclusão da Análise: 21/12/2012	

As amostras em epígrafe foram submetidas a Análise Mineralógica Semi-Quantitativa, por difração de raios-X, na amostra tal-qual, cujos resultados constam do quadro seguinte:

N/Ref. ^a	V/Ref. ^a	Clorite (%)	Caulinite (%)	Mica (%)	Calcite (%)	Quartzo (%)	Feld Na (%)	Feld K (%)	Hematite (%)
9556NM	X1	46	-	39	-	10	5	-	Vest.
9557NM	X2	50	-	39	-	6	5	-	-
9558NM	G1	-	75	17	-	8	-	-	-
9559NM	G2	-	69	14	-	16	-	1	-
9560NM	C1	-	4	10	77	3	-	-	6
9561NM	C2	-	7	9	73	5	-	-	6

S. Mamede de Infesta, 04/01/2013

O Responsável pelo Sector de RMIN I



Álvaro Oliveira
(Geólogo)

Rua da Amieira, Apartado 1089
4455-001 S. MAMEDE DE INFESTA - Portugal
Tel: +351 229 400 600
Fax: +351 229 514 040
www.lneg.pt

Este Boletim não pode ser parcialmente reproduzido sem autorização por escrito dada pela Direcção da UCTM-Lab. Os resultados referem-se exclusivamente às amostras recebidas e ensaiadas. Qualquer extrapolação é da exclusiva responsabilidade do requerente.

Colecção 2010
Mod. nº 013

15OUT2010

X'Pert Software - Philips Analytical
(searched) peak list: cl476

9/18/2013 16:25

Description:
CL>4,76

Original scan: cl476
Description of scan:
CL>4,76

Date 5/13/2013 09:45

Used wavelength:

K-Alpha

K-Alpha1 wavelength (Å): 1.5405620
K-Alpha2 wavelength (Å): 1.5443900
K-Alpha2/K-Alpha1 intensity ratio: 0.5000
K-Alpha wavelength (Å): 1.5405620
K-Beta wavelength (Å):

CL
Rocha Tobi

Peak search parameter set:

As Measured Intensities

Set created:

4/22/2013 15:52

Peak positions defined by:

Minimum of 2nd derivative

Minimum peak tip width (°2Theta):

0.05

Minimum peak tip width (°2Theta):

1.00

Peak base width (°2Theta):

2.00

Minimum significance:

0.50

d-spacing (Å)	Relative Intensity (%)	Angle (°2Theta)	Peak Height (counts)	Background (counts)	Tip Width (°2Theta)	Significance
29.65793	0.22	2.97653	43.94	92.26	0.48000	0.57
14.60360	0.07	6.04705	13.01	73.26	0.32000	0.52
11.54774	0.10	7.64940	19.80	66.85	0.08000	0.53
9.93647	0.38	8.89213	74.65	61.89	0.06000	0.64
8.81832	0.07	10.02235	12.96	57.41	0.06000	0.60
7.77277	0.06	11.37468	12.49	56.39	0.32000	0.61
7.07868	0.16	12.49425	32.49	55.54	0.24000	0.99
4.97735	0.15	17.80543	30.00	56.17	0.12000	0.60
4.48555	0.46	19.77624	91.67	57.19	0.24000	1.44
4.25415	2.09	20.86367	413.32	57.74	0.14000	9.39
3.84927	5.38	23.08688	1060.71	58.89	0.16000	16.78
3.70525	0.32	23.99734	63.30	59.36	0.12000	0.59
3.53303	0.30	25.18585	58.76	59.97	0.32000	0.86
3.34891	9.02	26.59527	1780.62	60.69	0.12000	15.65
3.24285	1.27	27.48186	249.97	61.15	0.08000	1.43
3.12926	0.65	28.50017	127.82	61.68	0.08000	1.36
3.03353	100.00	29.41947	19732.25	62.15	0.16000	83.24
2.90947	0.75	30.70414	147.72	62.81	0.16000	1.16
2.84095	1.91	31.46358	377.69	63.20	0.12000	4.23
2.78655	0.17	32.09425	32.57	63.53	0.32000	0.50
2.71200	0.39	33.00142	77.85	63.99	0.08000	0.79
2.56349	0.52	34.97299	102.37	65.01	0.24000	1.21
2.49402	10.04	35.98000	1982.04	65.53	0.18000	23.98

Laboratório Difrração de Raios X - Departamento de Ciências da Terra

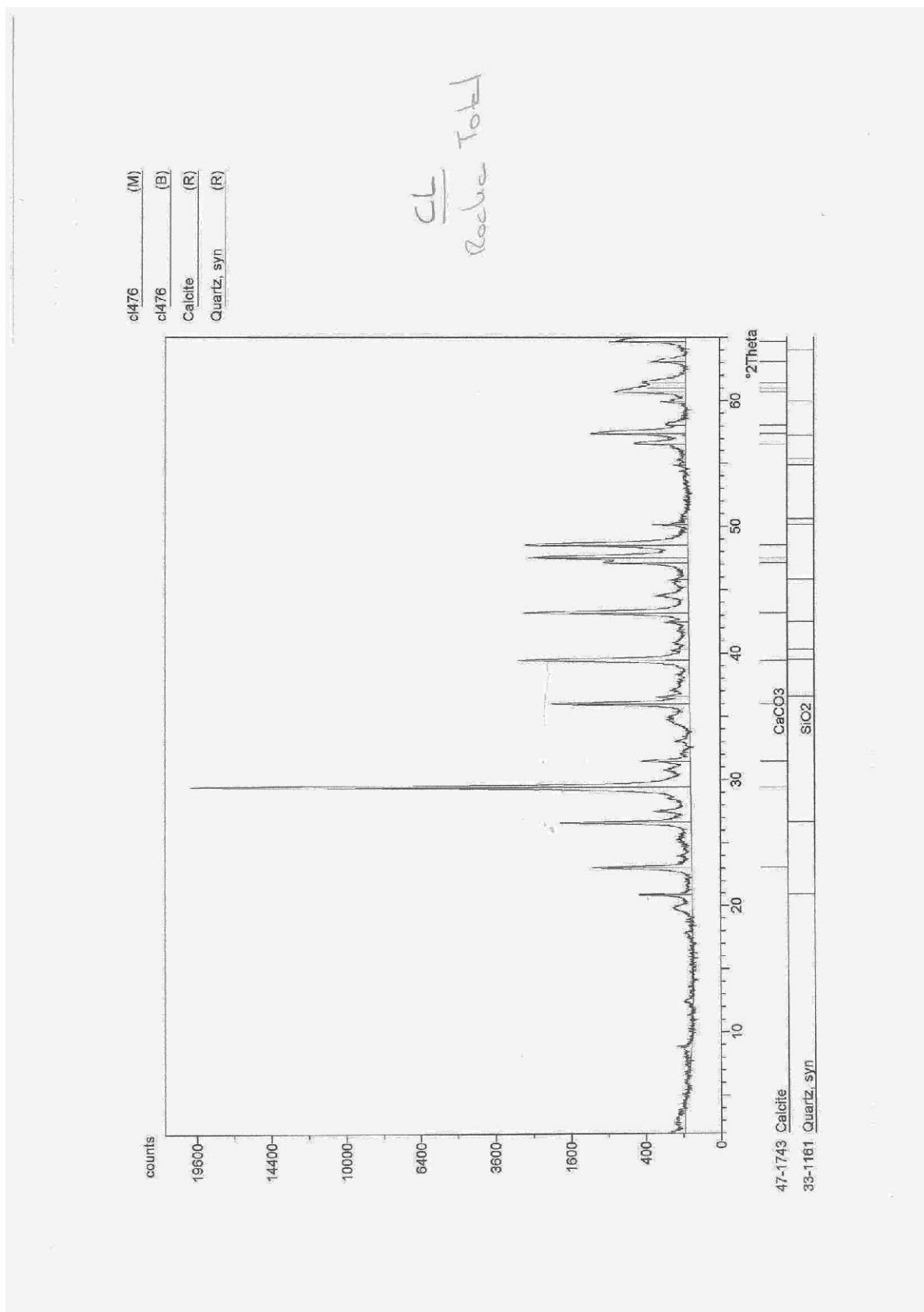
Page: 1

Universidade do Minho

X'Pert Software - Philips Analytical
(searched) peak list: cl476

9/18/2013 16:25

d-spacing (Å)	Relative Intensity (%)	Angle (°2Theta)	Peak Height (counts)	Background (counts)	Tip Width (°2Theta)	Significance
2.45891	1.17	36.51176	230.66	65.80	0.08000	1.12
2.42202	0.40	37.08788	79.03	66.10	0.20000	0.99
2.34982	0.25	38.27107	50.00	66.70	0.24000	0.63
2.28396	14.01	39.41966	2764.84	67.30	0.16000	21.42
2.23804	0.49	40.26311	96.48	67.73	0.10000	0.76
2.20767	0.41	40.84147	81.23	68.03	0.20000	1.26
2.12973	0.71	42.40679	140.83	68.83	0.08000	1.02
2.09366	13.00	43.17366	2566.01	69.23	0.12000	11.14
2.08680	6.90	43.32276	1360.88	69.30	0.08000	0.84
2.03382	1.18	44.51087	232.86	69.92	0.12000	2.09
1.99213	0.36	45.49399	70.30	70.42	0.20000	0.71
1.98129	0.60	45.75696	117.96	70.56	0.06000	0.88
1.92705	4.19	47.12133	826.39	71.26	0.16000	7.86
1.91119	12.28	47.53647	2422.39	71.47	0.14000	9.45
1.87463	13.08	48.52236	2580.46	71.98	0.14000	11.35
1.81939	0.84	50.09542	165.67	72.79	0.06000	0.93
1.81437	0.45	50.24370	89.63	72.87	0.06000	0.69
1.67354	0.26	54.80928	51.87	82.02	0.16000	0.95
1.66001	0.15	55.29396	29.55	82.02	0.20000	0.97
1.63454	0.48	56.23113	94.96	82.02	0.08000	0.50
1.62528	2.19	56.58022	432.34	82.02	0.10000	1.64
1.60333	5.49	57.42645	1084.26	82.02	0.12000	4.66
1.58296	0.57	58.23570	111.77	82.02	0.24000	2.26
1.54237	0.87	59.92248	171.82	82.02	0.06000	0.77
1.52504	3.22	60.67450	635.11	82.02	0.10000	2.12
1.50854	1.68	61.40960	330.56	82.02	0.06000	0.65
1.47329	0.92	63.04465	182.42	82.02	0.06000	0.55
1.44007	3.21	64.67326	632.60	82.02	0.14000	5.31



X'Pert Software - Philips Analytical
(searched) peak list: 30rt

3/19/2013 16:44

Description:
30RT

Original scan: 30rt
Description of scan:
30RT

Date 3/19/2013 11:30

Used wavelength:

K-Alpha

K-Alpha1 wavelength (Å): 1.5405620
K-Alpha2 wavelength (Å): 1.5443900
K-Alpha2/K-Alpha1 intensity ratio : 0.5000
K-Alpha wavelength (Å): 1.5405620
K-Beta wavelength (Å):

GR
Rocha total

Peak search parameter set:

As Measured Intensities

Set created:

2/15/2012 11:24

Peak positions defined by:

Minimum of 2nd derivative

Minimum peak tip width (°2Theta):

0.05

Minimum peak tip width (°2Theta):

1.00

Peak base width (°2Theta):

2.00

Minimum significance:

0.50

d-spacing (Å)	Relative Intensity (%)	Angle (°2Theta)	Peak Height (counts)	Background (counts)	Tip Width (°2Theta)	Significance
43.32931	1.82	2.03724	187.43	81.32	0.08000	0.71
19.13130	0.94	4.61503	96.44	81.32	0.32000	0.58
13.99436	1.82	6.31057	187.56	81.32	0.20000	0.65
12.04282	13.40	7.33449	1382.20	81.32	0.16000	8.16
10.22318	11.43	8.64227	1178.58	81.32	0.32000	1.79
9.99742	10.92	8.83780	1126.42	81.32	0.10000	1.42
8.15142	3.14	10.84468	324.27	81.32	0.24000	2.69
7.15301	29.32	12.36392	3023.93	81.32	0.24000	23.59
6.50832	0.71	13.59415	73.60	81.32	0.06000	0.53
5.72140	0.48	15.47464	49.00	81.32	0.08000	0.55
4.99896	1.79	17.72784	185.08	83.75	0.08000	0.76
4.88429	1.45	18.14752	149.10	84.59	0.06000	0.72
4.46955	2.56	19.84775	264.55	87.99	0.08000	0.51
4.25213	20.03	20.87370	2065.99	90.04	0.10000	10.50
3.94485	4.44	22.52011	457.68	93.34	0.06000	0.82
3.85687	2.43	23.04076	250.73	94.38	0.12000	0.56
3.78416	3.70	23.48976	381.27	95.28	0.12000	1.47
3.58841	31.39	24.79095	3238.11	97.88	0.10000	1.17
3.57312	35.95	24.89871	3707.87	98.09	0.12000	3.27
3.47732	19.29	25.59615	1989.88	99.49	0.10000	2.55
3.34241	100.00	26.64795	10314.55	101.59	0.12000	28.00
3.23427	17.80	27.55618	1836.37	103.41	0.08000	3.24
3.18787	4.62	27.96542	476.96	104.22	0.08000	1.48

Laboratório Difração de Raios X - Departamento de Ciências da Terra

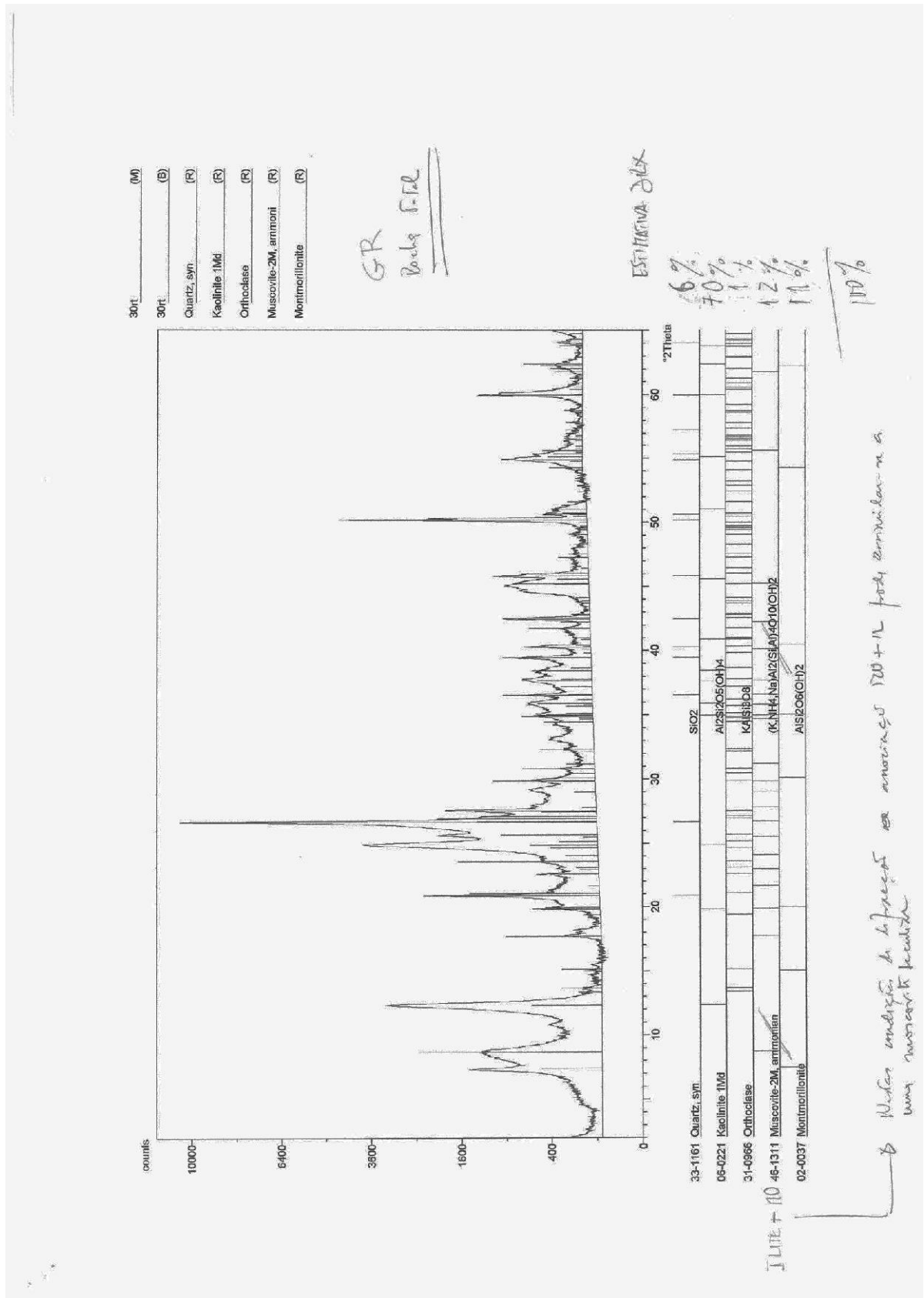
Page: 1

Universidade do Minho

X'Pert Software - Philips Analytical
(searched) peak list: 30rt

3/19/2013 16:44

d-spacing (Å)	Relative Intensity (%)	Angle (°2Theta)	Peak Height (counts)	Background (counts)	Tip Width (°2Theta)	Significance
3.05804	4.83	29.17842	498.46	106.65	0.32000	5.57
2.98718	6.28	29.88652	647.49	108.07	0.08000	1.95
2.89895	1.89	30.81838	195.33	109.93	0.08000	0.91
2.76678	1.57	32.32989	161.51	112.95	0.20000	1.47
2.70690	2.99	33.06532	308.07	114.42	0.10000	0.79
2.61940	2.60	34.20327	267.86	116.70	0.24000	1.42
2.56906	3.59	34.89471	370.17	118.08	0.12000	0.67
2.49624	4.69	35.94694	483.87	120.18	0.40000	8.83
2.45738	5.60	36.53536	577.89	121.36	0.08000	1.87
2.38171	5.49	37.73911	566.41	123.77	0.16000	1.67
2.34343	3.88	38.37953	399.73	125.05	0.20000	1.21
2.32547	2.92	38.68767	301.69	125.66	0.12000	0.51
2.28413	6.06	39.41653	624.98	127.12	0.12000	4.77
2.23704	5.33	40.28193	549.59	128.85	0.08000	2.40
2.16432	1.81	41.69727	187.16	131.68	0.16000	1.29
2.12743	7.87	42.45496	811.36	133.20	0.10000	4.63
2.03333	4.91	44.52224	506.50	137.33	0.24000	3.87
2.01035	7.34	45.05891	757.45	138.40	0.28000	4.38
1.99665	5.25	45.38507	541.06	139.06	0.16000	0.51
1.97974	9.05	45.79486	933.39	139.88	0.10000	3.69
1.92458	1.20	47.18552	123.59	142.66	0.08000	0.52
1.89624	0.83	47.93457	85.49	144.15	0.12000	0.89
1.85710	0.65	49.01049	67.30	146.30	0.20000	1.27
1.81767	42.31	50.14626	4364.59	148.58	0.06000	5.48
1.81280	19.49	50.29022	2010.49	148.86	0.06000	2.96
1.80231	3.26	50.60351	335.92	149.49	0.06000	0.97
1.79805	2.91	50.73175	300.35	149.75	0.06000	0.53
1.78685	2.05	51.07271	211.67	150.43	0.16000	1.00
1.67171	7.70	54.87399	793.81	174.89	0.08000	1.55
1.66740	6.05	55.02795	623.80	174.89	0.08000	0.68
1.66059	3.54	55.27282	365.12	174.89	0.08000	0.58
1.61991	0.90	56.78491	92.36	174.89	0.32000	0.77
1.59342	0.46	57.81719	47.77	174.89	0.12000	0.68
1.57163	0.56	58.69653	57.26	174.89	0.12000	0.74
1.54196	11.36	59.93984	1172.16	174.89	0.08000	3.10
1.53830	8.03	60.09744	828.12	174.89	0.06000	0.67
1.49426	1.42	62.06104	146.92	174.89	0.20000	0.64
1.48934	1.83	62.28864	188.49	174.89	0.16000	0.59
1.45312	1.65	64.02273	170.61	174.89	0.08000	1.22



X'Pert Software - Philips Analytical
(searched) peak list: 30crivo

3/19/2013 16:10

Description:
30crivo

Original scan: 30crivo
Description of scan:
30crivo

Date 3/19/2013 12:42

Used wavelength: K-Alpha

K-Alpha1 wavelength (Å): 1.5405620
K-Alpha2 wavelength (Å): 1.5443900
K-Alpha2/K-Alpha1 intensity ratio: 0.5000
K-Alpha wavelength (Å): 1.5405620
K-Beta wavelength (Å):

Peak search parameter set: As Measured Intensities
Set created: 2/15/2012 11:24
Peak positions defined by: Minimum of 2nd derivative
Minimum peak tip width (°2Theta): 0.05
Minimum peak tip width (°2Theta): 1.00
Peak base width (°2Theta): 2.00
Minimum significance: 0.50

*Porção com < 63 µm
% peso ≈ 98%*

d-spacing (Å)	Relative Intensity (%)	Angle (°2Theta)	Peak Height (counts)	Background (counts)	Tip Width (°2Theta)	Significance
23.43216	0.40	3.76763	17.40	119.60	0.10000	0.51
18.95493	0.63	4.65800	27.67	133.52	0.20000	0.59
18.18251	0.77	4.85599	33.74	138.80	0.32000	0.93
12.02913	3.13	7.34285	137.44	205.14	0.32000	1.50
9.95813	11.01	8.87275	483.27	245.95	0.10000	1.84
7.14011	79.43	12.38634	3485.87	243.70	0.24000	25.04
5.71481	2.08	15.49259	91.30	77.99	0.06000	0.89
5.00853	3.70	17.69369	162.52	75.04	0.10000	0.98
4.98186	3.49	17.78918	153.02	75.04	0.06000	1.10
4.46952	21.85	19.84792	958.81	75.04	0.08000	1.13
4.35532	21.89	20.37380	960.81	75.04	0.16000	2.53
4.24928	18.51	20.88785	812.24	75.04	0.20000	1.25
4.17750	20.17	21.25090	885.12	75.04	0.12000	0.55
3.85227	11.06	23.06864	485.35	75.04	0.32000	1.43
3.77519	14.62	23.54632	641.62	75.04	0.08000	1.11
3.56873	100.00	24.92981	4388.81	75.04	0.28000	33.12
3.45883	23.11	25.73531	1014.34	75.04	0.06000	0.67
3.34514	78.58	26.62582	3448.87	75.04	0.12000	14.82
3.29130	14.55	27.06958	638.64	75.04	0.06000	1.20
3.24436	12.54	27.46884	550.53	75.04	0.14000	3.16
3.20156	15.12	27.84338	663.38	75.04	0.16000	5.18
3.06365	5.59	29.12383	245.20	75.04	0.20000	0.75
3.00179	6.78	29.73769	297.47	75.04	0.10000	1.28

Laboratório Difração de Raios X - Departamento de Ciências da Terra

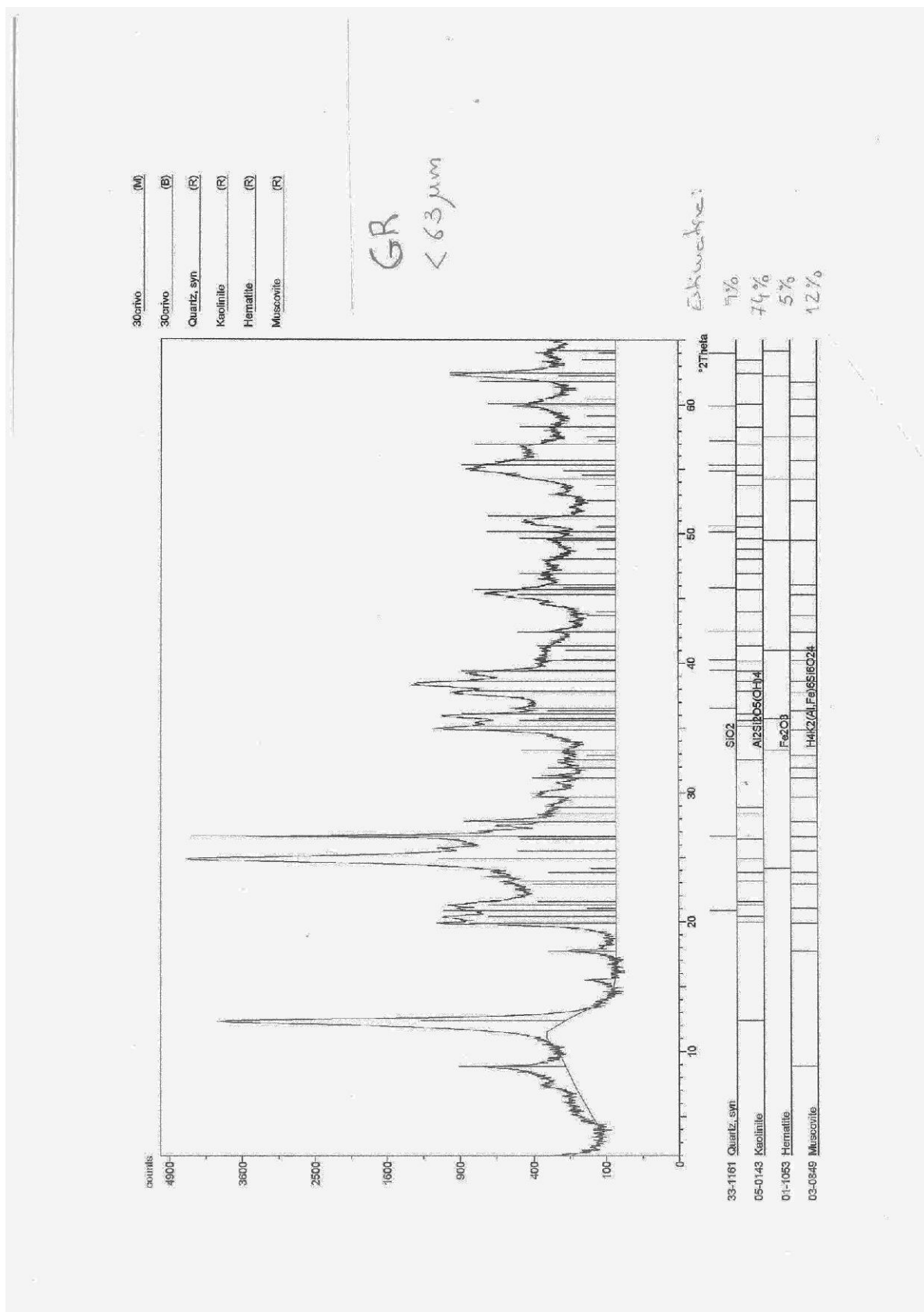
Page: 1

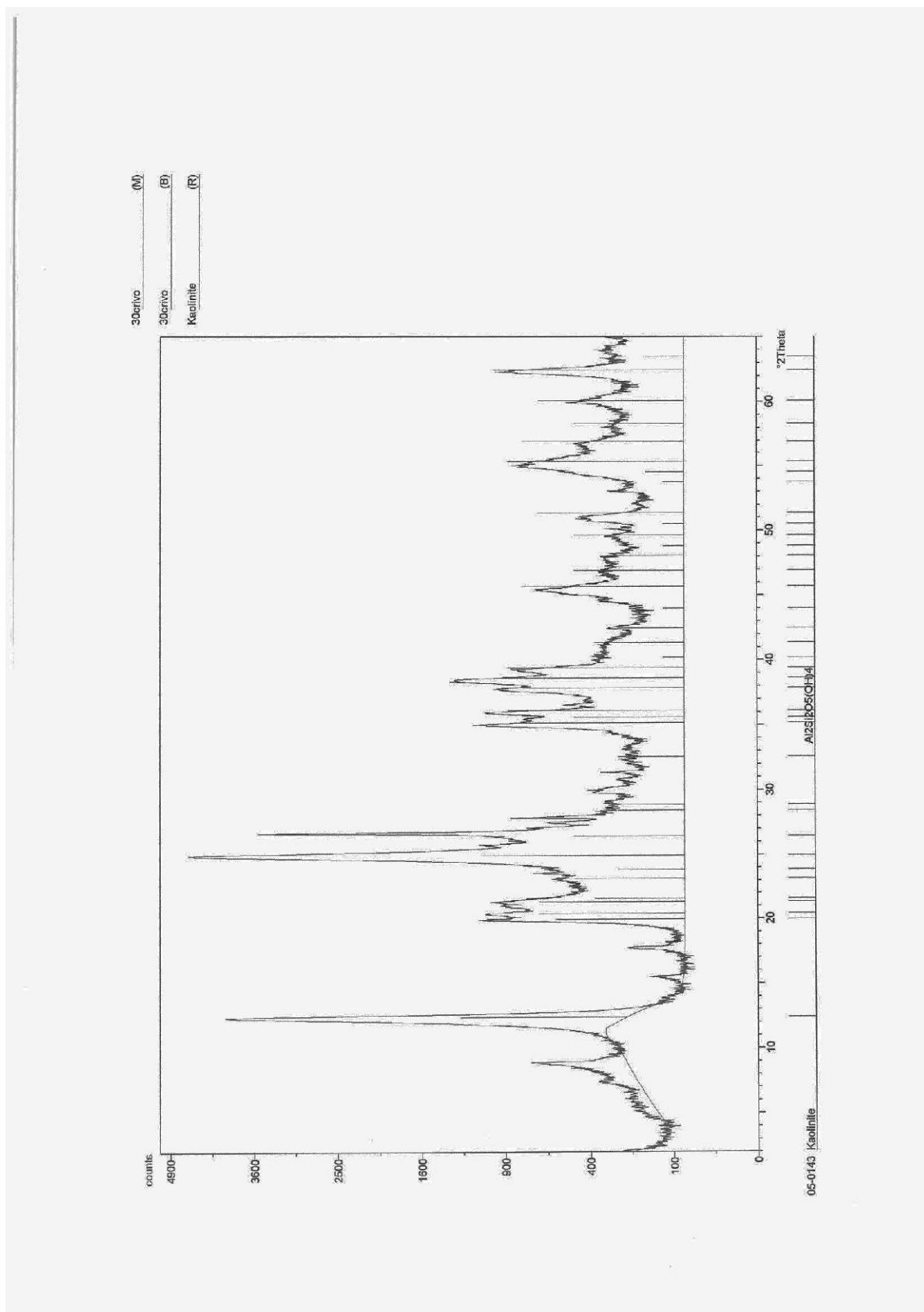
Universidade do Minho

X'Pert Software - Philips Analytical
(searched) peak list: 30crivo

3/19/2013 16:10

d-spacing (Å)	Relative Intensity (%)	Angle (°2Theta)	Peak Height (counts)	Background (counts)	Tip Width (°2Theta)	Significance
2.96424	5.80	30.12324	254.52	75.04	0.24000	1.14
2.90288	4.65	30.77553	204.08	75.04	0.12000	1.48
2.84983	4.92	31.36308	215.93	75.04	0.16000	1.71
2.79563	3.71	31.98728	162.96	75.04	0.12000	0.50
2.77060	3.95	32.28409	173.28	75.04	0.12000	0.60
2.68241	3.68	33.37604	161.47	75.04	0.40000	0.98
2.56855	21.58	34.90189	947.18	75.04	0.06000	0.56
2.56207	24.20	34.99302	1062.06	75.04	0.08000	0.79
2.49662	21.73	35.94127	953.75	75.04	0.32000	13.28
2.45733	9.38	36.53600	411.72	75.04	0.08000	0.58
2.37983	19.88	37.77003	872.71	75.04	0.32000	8.39
2.33735	26.89	38.48329	1180.06	75.04	0.36000	14.54
2.29304	16.67	39.25722	731.49	75.04	0.32000	6.31
2.18902	5.86	41.20523	257.40	75.04	0.48000	1.09
2.12654	5.44	42.47359	238.89	75.04	0.12000	1.19
2.03084	6.42	44.57970	281.87	75.04	0.20000	1.41
1.99644	13.69	45.39020	601.00	75.04	0.20000	2.12
1.93622	5.76	46.88479	252.97	75.04	0.48000	1.24
1.90110	5.80	47.80443	254.54	75.04	0.40000	1.36
1.83753	5.31	49.56727	232.97	75.04	0.08000	0.60
1.81968	4.95	50.08707	217.20	75.04	0.12000	1.02
1.79872	7.62	50.71168	334.30	75.04	0.10000	0.72
1.78708	8.55	51.06546	375.27	75.04	0.16000	0.97
1.75454	3.11	52.08310	136.33	75.04	0.16000	0.54
1.72617	4.98	53.00505	218.68	75.04	0.16000	1.50
1.68672	8.83	54.34534	387.63	75.04	0.32000	1.00
1.67201	16.64	54.86337	730.35	75.04	0.08000	0.65
1.66028	14.87	55.28403	652.62	75.04	0.16000	0.57
1.62112	8.73	56.73874	383.23	75.04	0.16000	0.54
1.58617	5.24	58.10649	230.13	75.04	0.32000	0.55
1.54235	10.11	59.92335	443.80	75.04	0.06000	1.45
1.48963	20.33	62.27524	892.24	75.04	0.08000	0.70
1.46748	5.51	63.32299	241.68	75.04	0.16000	0.67
1.45624	5.81	63.86950	254.77	75.04	0.32000	0.74
1.44788	5.67	64.28212	248.65	75.04	0.12000	0.66





X'Pert Software - Philips Analytical
(searched) peak list: xt238

9/18/2013 16:12

Description:
XT>2,38

Original scan: xt238
Description of scan:
XT>2,38

Date 5/13/2013 11:51

Used wavelength:

K-Alpha

K-Alpha1 wavelength (Å): 1.5405620
K-Alpha2 wavelength (Å): 1.5443900
K-Alpha2/K-Alpha1 intensity ratio: 0.5000
K-Alpha wavelength (Å): 1.5405620
K-Beta wavelength (Å):

XT
Reche to k1

Peak search parameter set:

As Measured Intensities

Set created:

4/22/2013 15:52

Peak positions defined by:

Minimum of 2nd derivative

Minimum peak tip width (°2Theta):

0.05

Minimum peak tip width (°2Theta):

1.00

Peak base width (°2Theta):

2.00

Minimum significance:

0.50

d-spacing (Å)	Relative Intensity (%)	Angle (°2Theta)	Peak Height (counts)	Background (counts)	Tip Width (°2Theta)	Significance
14.17219	6.25	6.23130	723.10	102.67	0.16000	13.43
9.98399	34.20	8.84528	3957.32	84.95	0.10000	21.35
7.07102	30.55	12.50784	3534.73	79.46	0.10000	17.58
6.39503	0.74	13.83613	85.81	75.31	0.08000	1.08
5.92280	0.15	14.94537	17.28	72.58	0.20000	0.69
5.60032	0.16	15.81132	18.24	71.32	0.08000	0.76
4.99157	13.55	17.75430	1568.38	70.31	0.12000	16.30
4.71379	8.98	18.80976	1039.46	70.31	0.10000	7.89
4.46437	2.94	19.87103	340.04	70.31	0.14000	4.72
4.25990	16.43	20.83522	1901.21	70.31	0.14000	20.84
4.11554	1.40	21.57464	161.59	70.31	0.08000	0.84
4.03093	3.64	22.03314	421.41	70.31	0.08000	2.10
3.96731	0.86	22.39097	99.50	70.31	0.12000	0.60
3.88466	3.50	22.87371	405.04	70.31	0.08000	1.57
3.85800	1.89	23.03391	218.79	70.31	0.10000	1.09
3.77880	3.43	23.52351	396.83	70.31	0.08000	1.66
3.73688	3.37	23.79127	390.03	70.31	0.12000	3.18
3.66167	2.57	24.28727	297.20	70.31	0.16000	5.29
3.53607	30.30	25.16386	3505.50	70.31	0.12000	19.17
3.49631	7.36	25.45478	851.14	70.31	0.10000	2.76
3.34794	100.00	26.60309	11571.06	70.31	0.08000	11.74
3.32536	45.67	26.78713	5284.67	70.31	0.08000	4.36
3.22023	8.97	27.67875	1037.95	70.31	0.06000	0.69

Laboratório Difrração de Raios X - Departamento de Ciências da Terra

Page: 1

Universidade do Minho

X'Pert Software - Philips Analytical
(searched) peak list: xt238

9/18/2013 16:12

d-spacing (Å)	Relative Intensity (%)	Angle (°2Theta)	Peak Height (counts)	Background (counts)	Tip Width (°2Theta)	Significance
3.19616	17.76	27.89137	2054.55	70.31	0.14000	12.80
3.15136	2.16	28.29608	249.72	70.31	0.06000	0.56
3.12540	1.29	28.53608	149.75	70.31	0.08000	0.80
2.99222	9.27	29.83500	1072.34	70.31	0.18000	15.02
2.93450	2.38	30.43590	275.69	70.31	0.10000	1.92
2.86495	8.28	31.19333	958.14	70.31	0.16000	12.17
2.82963	6.53	31.59283	755.18	70.31	0.10000	4.21
2.79460	5.43	31.99939	627.81	70.31	0.08000	1.26
2.78905	4.58	32.06474	529.50	70.31	0.06000	1.27
2.67421	0.57	33.48136	66.22	70.31	0.16000	0.51
2.64357	0.91	33.88107	105.13	70.31	0.12000	1.56
2.59680	4.04	34.51020	467.43	70.31	0.20000	5.87
2.56728	9.48	34.91977	1097.31	70.31	0.10000	2.44
2.56010	8.05	35.02078	930.91	70.31	0.10000	1.68
2.49724	5.76	35.93200	666.73	70.31	0.10000	2.63
2.45926	10.04	36.50641	1161.69	70.31	0.10000	5.34
2.39756	3.11	37.48039	360.09	70.31	0.16000	0.72
2.38331	3.57	37.71290	413.14	70.31	0.10000	1.30
2.32080	0.97	38.76865	112.27	70.31	0.20000	1.44
2.28370	7.18	39.42425	831.32	70.31	0.08000	3.53
2.23831	5.03	40.25799	581.57	70.31	0.08000	2.23
2.20577	1.01	40.87824	117.26	70.31	0.20000	0.81
2.18855	1.47	41.21441	170.43	70.31	0.08000	0.80
2.15182	2.28	41.95073	264.17	70.31	0.08000	0.89
2.12968	9.89	42.40778	1144.78	70.31	0.10000	4.97
2.09245	0.63	43.19991	72.37	70.31	0.12000	0.53
2.07621	1.10	43.55494	127.38	70.31	0.16000	1.01
2.05417	0.93	44.04669	107.17	70.31	0.16000	0.51
2.03807	1.97	44.41297	228.07	70.31	0.08000	0.60
1.99771	21.48	45.35973	2485.04	70.31	0.12000	9.78
1.99105	11.06	45.51986	1280.20	70.31	0.08000	0.72
1.98120	6.03	45.75906	697.18	70.31	0.06000	1.02
1.95241	1.57	46.47306	182.23	70.31	0.08000	0.93
1.88878	2.18	48.13576	252.15	70.31	0.28000	5.38
1.85147	1.21	49.16938	140.15	70.31	0.06000	0.52
1.81960	16.28	50.08926	1883.45	70.31	0.10000	9.21
1.81471	7.91	50.23366	915.73	70.31	0.06000	1.37
1.80389	3.04	50.55600	352.03	70.31	0.08000	1.99
1.79855	1.41	50.71687	162.92	70.31	0.06000	0.83
1.78570	1.33	51.10804	153.37	70.31	0.06000	0.83
1.75562	0.76	52.04855	88.42	70.31	0.08000	0.68
1.73083	1.92	52.85111	221.75	70.31	0.10000	0.54
1.72152	1.40	53.15926	161.63	70.31	0.10000	0.78
1.71357	1.33	53.42559	153.79	70.31	0.16000	0.54
1.68933	1.18	54.25440	136.37	70.31	0.24000	1.32
1.67313	4.52	54.82360	523.45	70.31	0.08000	1.82
1.66849	4.09	54.98895	473.09	70.31	0.06000	1.19
1.66071	4.31	55.26864	498.27	70.31	0.12000	2.09
1.64796	4.62	55.73326	534.62	70.31	0.16000	3.42

Laboratório Difrração de Raios X - Departamento de Ciências da Terra

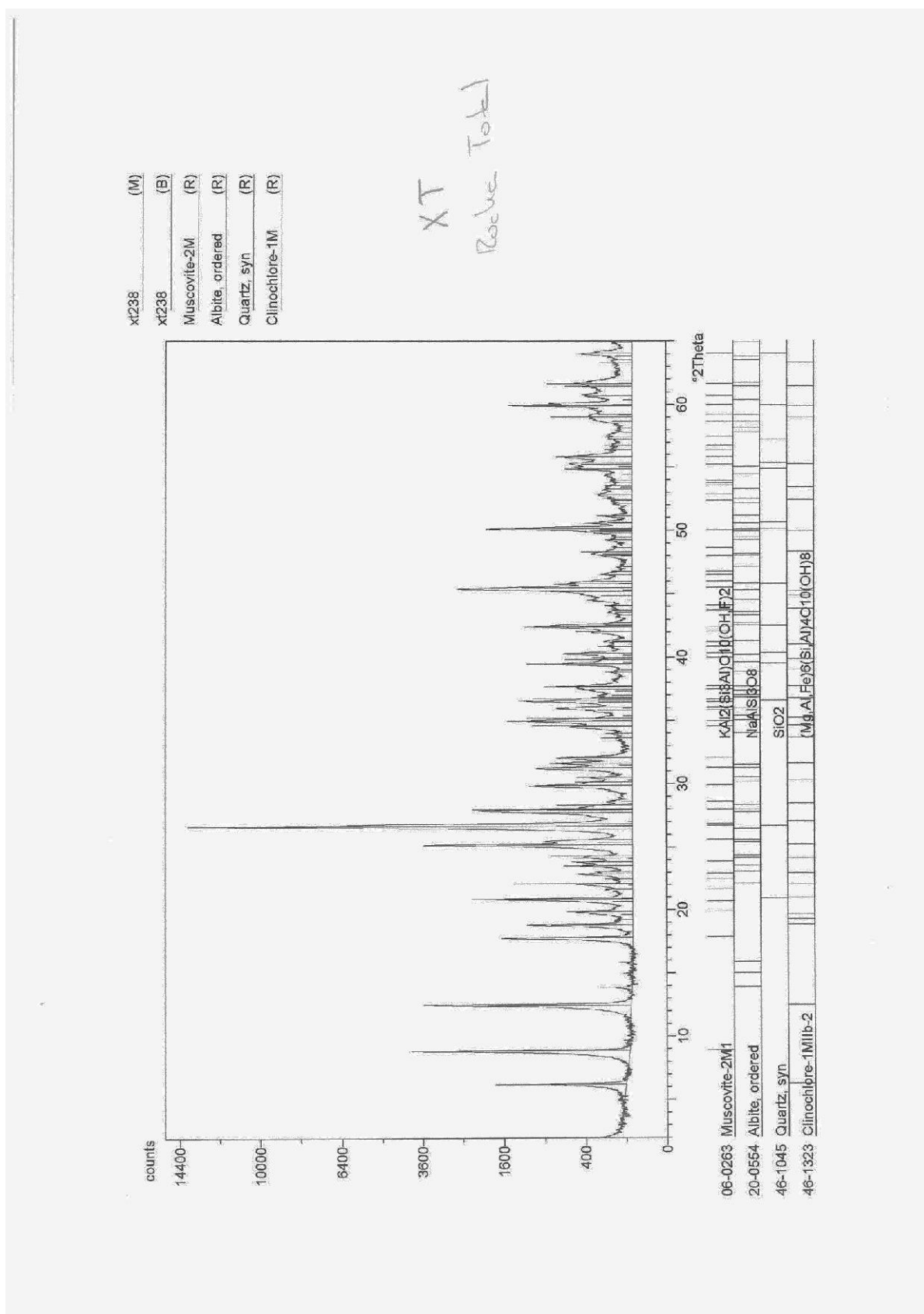
Page: 2

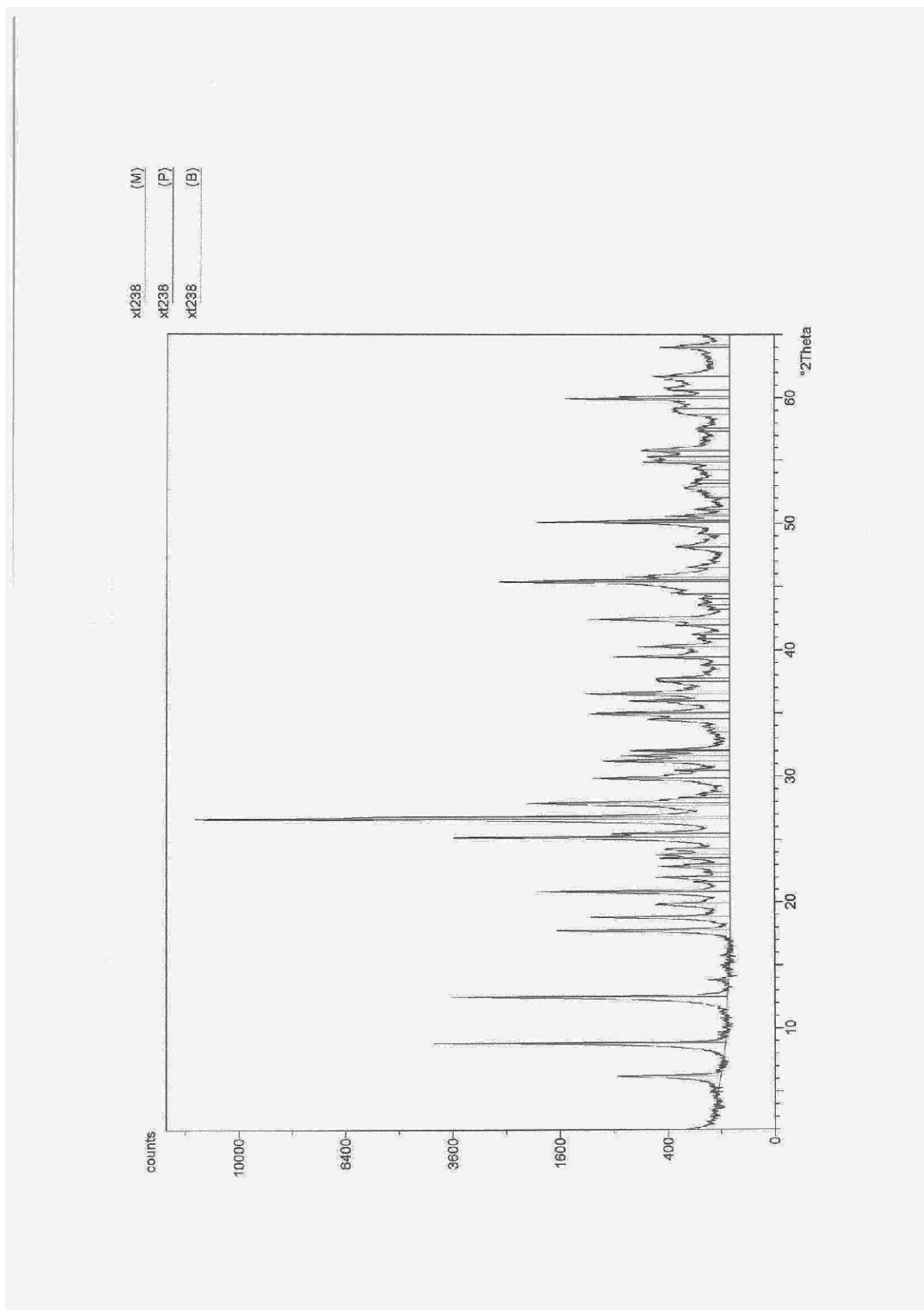
Universidade do Minho

X'Pert Software - Philips Analytical
(searched) peak list: xt238

9/18/2013 16:12

d-spacing (Å)	Relative Intensity (%)	Angle (°2Theta)	Peak Height (counts)	Background (counts)	Tip Width (°2Theta)	Significance
1.64426	4.04	55.86968	468.00	70.31	0.06000	0.55
1.60509	1.15	57.35750	132.79	70.31	0.10000	0.69
1.59899	1.12	57.59680	129.26	70.31	0.16000	0.78
1.57183	1.89	58.68834	219.23	70.31	0.16000	0.62
1.56046	2.45	59.15808	283.13	70.31	0.16000	0.69
1.54256	12.61	59.91445	1458.60	70.31	0.08000	5.08
1.53849	6.53	60.08933	755.35	70.31	0.08000	3.01
1.52659	2.84	60.60630	329.03	70.31	0.10000	1.20
1.50275	3.87	61.67197	447.90	70.31	0.10000	1.27
1.45393	3.36	63.98271	388.32	70.31	0.12000	3.26
1.45005	1.87	64.17469	216.01	70.31	0.06000	0.76





Caracterização do BSoil:

	TC (%)	Média (%)	RSD (%)	IC (%)	Média (%)	RSD (%)	TOC (%)
BSoil1	11,041	11,004	2,6	0	0	0	11,004
	11,239			0			
	10,599			0			
	11,139			0			
BSoil2	1,287	1,329	3,9	0	0	0	1,329
	1,386			0			
	1,315			0			
	1,329			0			

	N (%)	Média (%)	RSD (%)	P (%)	Média (%)	RSD (%)
BSoil1	0,137	0,136	1,6	0,0296 0,0287	0,029	2,3
	0,139					
	0,134					
	0,136					
BSoil2	0,050	0,051	3,3	0,0402 0,0413	0,041	2,0
	0,051					
	0,054					
	0,052					

	BSoil1		BSoil2	
	(%)	Proporção	(%)	Proporção
C (%)	11,00	100	1,33	100
N (%)	0,14	1,27	0,05	3,78
P (%)	0,03	0,27	0,04	3,01

Quantificação da biomassa no BSoil:

Amostra	BSoil1_1	BSoil1_2	BSoil2_1	BSoil2_2
Biomassa (CFU/mL)	9,94E+06	1,06E+07	7,71E+06	9,99E+06

Caracterização dos solos granítico, calcário e xistoso:

	TC (%)	Média (%)	RSD (%)	IC (%)	Média (%)	RSD (%)	TOC (%)
SR	0,379	0,396	7,8	0	0	0	0,396
	0,367			0			
	0,390			0			
	0,447			0			
	0,395			0			
CL	10,534	10,566	3,2	9,938	9,914	2,9	0,651
	10,891			10,242			
	10,302			9,771			
	10,934			9,508			
	10,168			10,113			
XT	0,467	0,498	7,6	0	0	0	0,498
	0,505			0			
	0,557			0			
	0,464			0			
	0,497			0			

	N (%)	Média (%)	RSD (%)	P (%)	Média (%)	RSD (%)
SR	0,021	0,022	4,1	1,784	0,172	3,9
	0,021			1,730		
	0,022			1,165		
	0,023					
CL	0,017	0,017	5,5	0,0647	0,068	6,7
	0,016			0,0712		
	0,017					
	0,018					
XT	0,014	0,013	6,2	0,0547	0,055	0,3
	0,012			0,0549		
	0,013					
	0,012					

	SR		CL		XT	
	(%)	Proporção	(%)	Proporção	(%)	Proporção
C (%)	0,396	100	0,651	100	0,498	100
N (%)	0,022	5,6	0,017	2,6	0,013	2,6
P (%)	0,172	43,4	0,068	10,5	0,055	11,0

Amostra	SR_1	SR_2	CL_1	CL_2	XT_1	XT_2
Biomassa (CFU/mL)	3,73E+03	4,50E+03	1,28E+03	2,33E+03	2,93E+03	3,19E+03

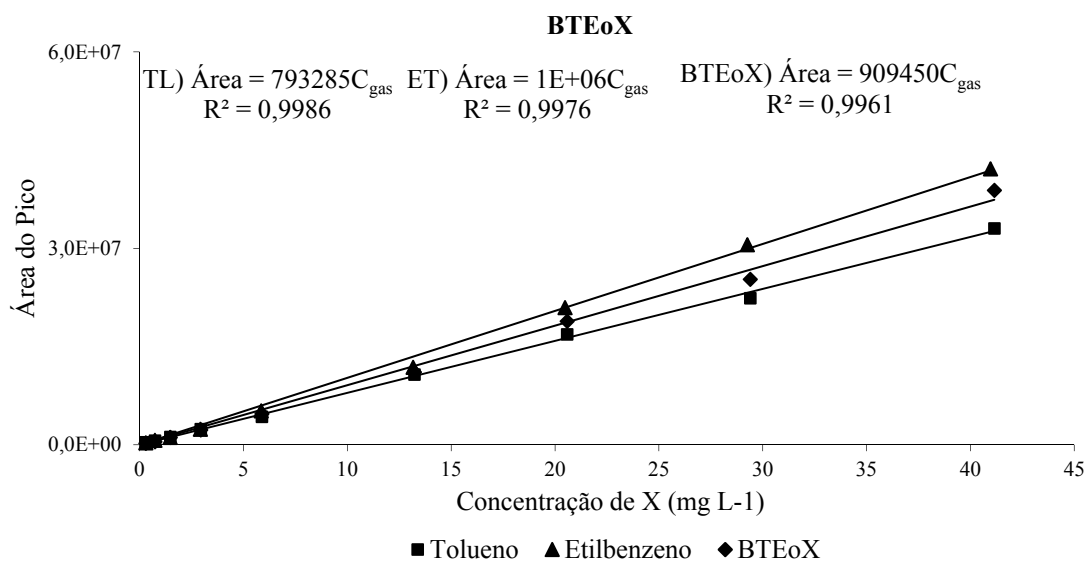
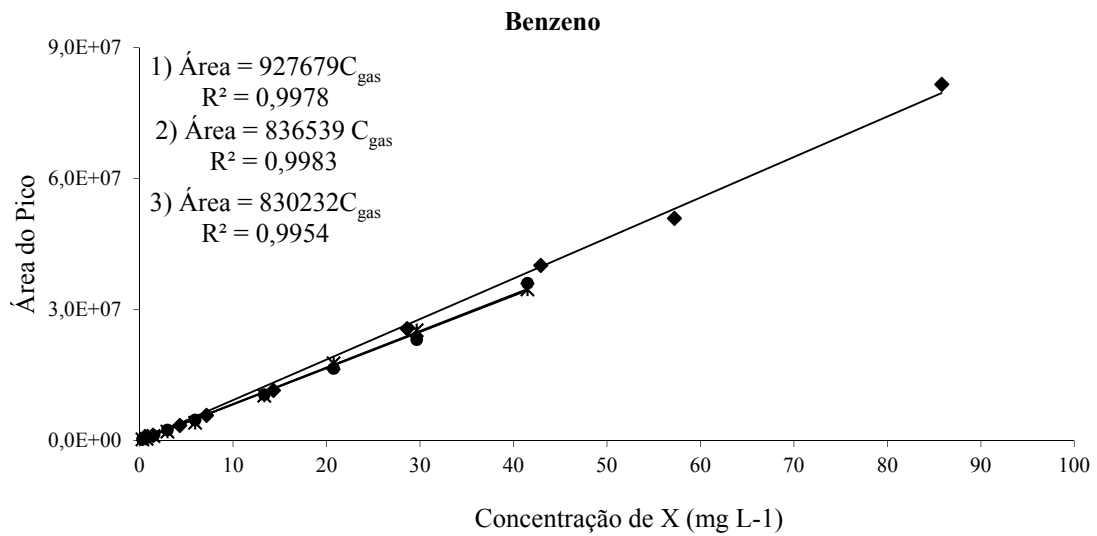
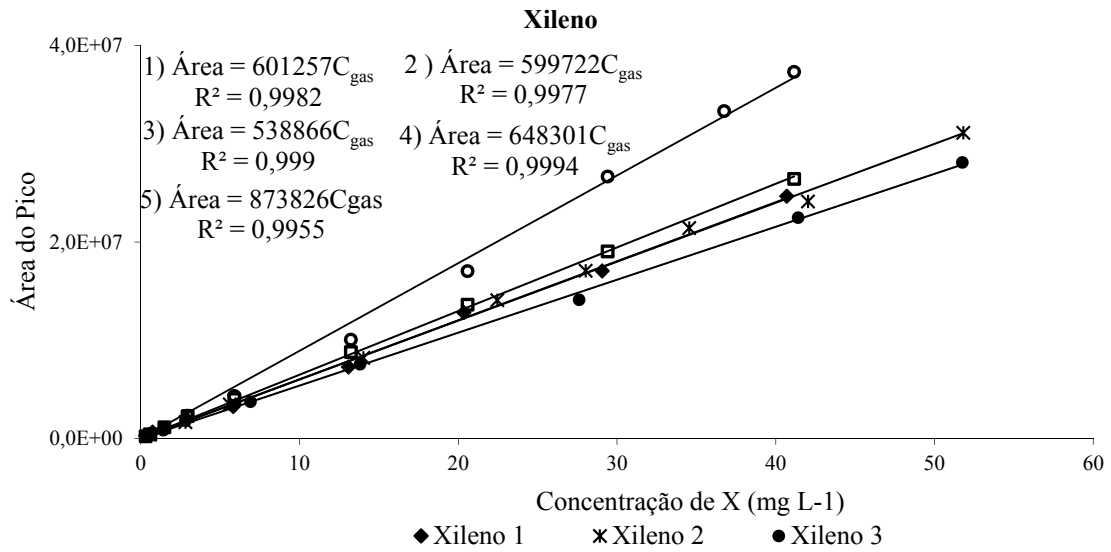
Determinação experimental do teor em água de saturação

	Calcário		Granito		Xisto	
	Calcário1	Calcário2	Granito1	Granito2	Xisto1	Xisto2
Recipiente	128,16	126,15	128,88	102,61	131,12	67,27
Recipiente + Solo Húmido	614,96	473,79	545	518	467,59	404,62
Recipiente + Solo Seco	533,06	416,17	413,39	385,52	390,06	329,45
Massa Água	81,9	57,62	131,61	132,48	77,53	75,17
Massa Solo Seco	404,9	290,02	284,51	282,91	258,94	262,18
Teor em água de Saturação,(%)	20,23	19,87	46,26	46,83	29,94	28,67
	20,05		46,54		29,31	
Teor em água usado (%)	11,00		25,00		14,50	
Grau Saturação (%)	55		54		49	

ANEXO II – ANÁLISE CROMATOGRÁFICA - CALIBRAÇÃO

XL (mg L ⁻¹)	0,2905	0,7264	1,4527	2,9054	5,8108	13,0743	20,3378	29,0541	40,6757
	309494	602426	1027481	2057505	3362538	7414383	13330102	17111675	24988294
Áreas GC	289137	621853	1020189	1857529	3106062	7114493	12182302	17503379	24461326
	281062	689799	1017217	1946669	3286123	7310965	12940631	16533945	24524840
Média	293231	638026	1021629	1953901	3251574	7279947	12817678	17049666	24658153
DesvioP	14651,5	45876,8	5281,3	100184,0	131682,2	152332,2	583694,5	487682,7	287668,5
RSD (%)	5,0	7,2	0,5	5,1	4,0	2,1	4,6	2,9	1,2
XL (mg L ⁻¹)	0,5629	2,8013	5,6026	14,0065	22,4498	28,0130	34,5382	42,0195	51,8072
	397560	1651847	3404206	7946591	14109019	17002956	21363589	24944854	30072698
Áreas GC	384855	1644388	3510288	8617011	14080419	17259928	21091274	23912854	32455285
	380899	1687767	3464497	8065779	14001788	16920583	21816730	23522560	30791697
Média	387771	1661334	3459664	8209794	14063742	17061156	21423864	24126756	31106560
DesvioP	8704,9	23193,5	53205,9	357660,3	55526,7	177000,4	366464,8	734878,0	1222102,4
RSD (%)	2,2	1,4	1,5	4,4	0,4	1,0	1,7	3,0	3,9
XL (mg L ⁻¹)	0,5603	1,4007	2,8013	6,8993	13,7986	27,5973	41,3959	51,7449	
	345919	856391	1837665	3858541	7327191	13991850	23214598	27916880	
Áreas GC	358242	822608	1769292	3628697	7768627	14239396	21730968	28286541	
	352081	839500	1803479	3743619	7547909	14115623	22472783	28101711	
Média	352081	839500	1803479	3743619	7547909	14115623	22472783	28101711	
DesvioP	8713,7	23888,2	48347,0	162524,3	312142,4	175041,5	1049084,8	261389,8	
RSD (%)	2,5	2,8	2,7	4,3	4,1	1,2	4,7	0,9	
BZ(mg L ⁻¹)	0,5720	1,4300	4,2899	7,1498	14,2997	28,5993	42,8990	57,1987	85,7980
	961986	1239998	3518391	5698234	12587236	24520340	40192701	48588066	80304785
Áreas GC	907434	1252068	3433235	5818722	10365924	26733537	40048154	53192745	82845402
	934710	1246033	3475813	5758478	11476580	25626939	40120428	50890406	81575094
Média	934710	1246033	3475813	5758478	11476580	25626939	40120428	50890406	81575094
DesvioP	38574,1	8534,8	60214,4	85197,9	1570704,8	1564966,6	102210,2	3255999,7	1796487,5
RSD (%)	4,1	0,7	1,7	1,5	13,7	6,1	0,3	6,4	2,2
BZ(mg L ⁻¹)	0,2963	0,7407	1,4814	2,9628	5,9257	13,3328	20,7399	29,6284	41,4797
	274830	433518	1056878	2086296	4076883	10694773	17762015	25214200	34448615
Áreas GC	273662	444317	1029355	2096260	4071174	9879733	17630559	25333927	34789884
	274246	438918	1043117	2091278	4074029	10287253	17696287	25274064	34619250
Média	274246	438918	1043117	2091278	4074029	10287253	17696287	25274064	34619250
DesvioP	825,9	7636,0	19461,7	7045,6	4036,9	576320,3	92953,4	84659,8	241313,6
RSD (%)	0,3	1,7	1,9	0,3	0,1	5,6	0,5	0,3	0,7
BTEoX (mg L ⁻¹)	0,2939	0,7348	1,4696	2,9392	5,8784	13,2264	20,5743	29,3919	41,1486
	201940	472594	1109306	2198620	4805824	10853175	19042719	24944834	37017247
Áreas GC	206204	458715	1135486	2321089	4619553	11320662	18649156	25570486	40666343
	204072	465654,5	1122396	2259855	4712689	11086919	18845938	25257660	38841795
Média	204072	465654,5	1122396	2259855	4712689	11086919	18845938	25257660	38841795
DesvioP	3015,1	9813,9	18512,1	86598,7	131713,5	330563,2	278291,1	442402,8	2580300,5
RSD (%)	1,5	2,1	1,6	3,8	2,8	3,0	1,5	1,8	6,6

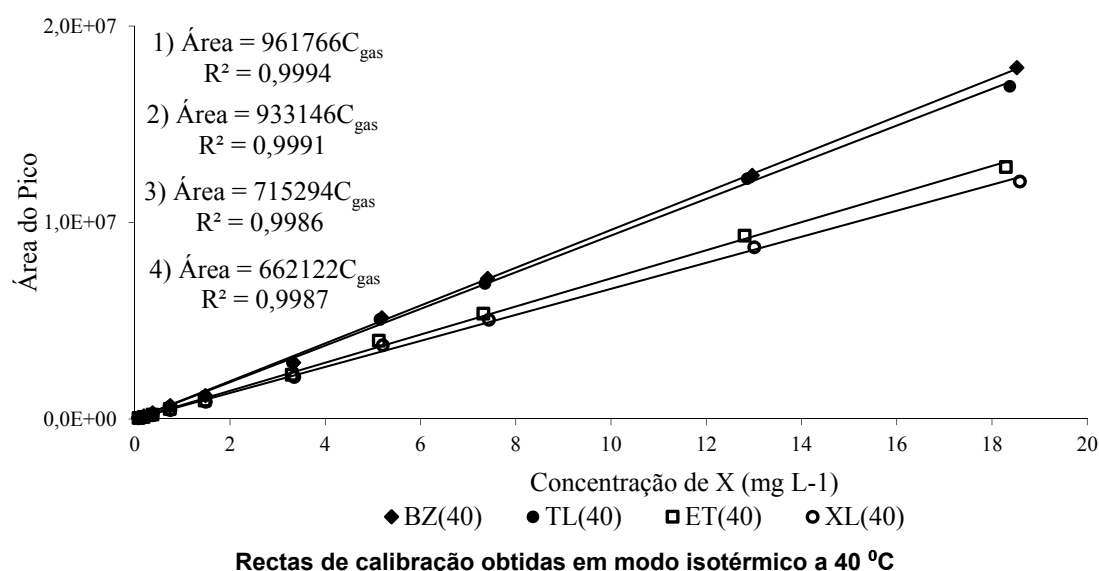
BZ (mg L ⁻¹)	0,2963	0,7407	1,4814	2,9628	5,9257	13,3328	20,7399	29,6284	41,4797
	299516	681043	1131261	2637078	4697750	10294801	15743197	22460534	35960511
Áreas GC	304652	670034	1237894	2402315	4877776	10643820	16392831	24730388	34880293
	343042	682460	1105685	2319794	4727750	10726906	17369313	22140540	37301780
Média	3,16E+05	6,78E+05	1,16E+06	2,45E+06	4,77E+06	1,06E+07	1,65E+07	2,31E+07	3,60E+07
DesvioP	23786	6802	70124	164617	96451	229286	818514	1411969	1213086
RSD (%)	7,5	1,0	6,1	6,7	2,0	2,2	5,0	6,1	3,4
TL (mg L ⁻¹)	0,2939	0,7348	1,4696	2,9392	5,8784	13,2264	20,5743	29,3919	41,1486
	373663	660931	1257101	2402362	4260808	11399015	16075444	23436368	32704575
Áreas GC	363446	576583	1116641	2242416	4319168	10167538	16503574	21664628	33836810
	391635	629607	1215488	2472189	4221094	10596803	17959751	22013507	32555255
Média	376248	622373,6667	1196410	2372322,333	4267023,333	10721119	16846256,33	22371501	33032213
DesvioP	14271	42637	72147	117795	49332	625080	987789	938555	700790
RSD (%)	3,8	6,9	6,0	5,0	1,2	5,8	5,9	4,2	2,1
ET (mg L ⁻¹)	0,2926	0,7314	1,4628	2,9257	5,8514	13,1655	20,4797	29,2568	40,9595
	299785	674147	1129816	2329335	5180113	11640941	20922939	29925296	41848214
Áreas GC	273843	667748	1061050	2271140	5033167	11443404	21112194	30289534	42542600
	264437	667613	1141180	2448651	5281739	12399316	20779027	31405883	41964591
Média	279355	669836	1110682	2349708,667	5165006,333	11827887	20938053,33	30540237,7	42118468
DesvioP	18307	3734	43357	90492	124973	504632	167097	771475	371889
RSD (%)	6,6	0,6	3,9	3,9	2,4	4,3	0,8	2,5	0,9
XL (mg L ⁻¹)	0,2939	0,5878	1,4696	2,9392	5,8784	13,2264	20,5743	29,3919	41,1486
	217776	435847	1115118	2284818	4099758	8325428	14453435	18356983	26861290
Áreas GC	217968	400687	1224646	2320664	3963097	8995095	13105526	19546075	27415199
	228912	421982	1047084	2208401	3953695	9042588	13280692	19203931	24993935
Média	221552	419505,3333	1128949,333	2271294,333	4005516,667	8787703,7	13613217,67	19035663	26423475
DesvioP	6375	17710	89585	57340	81751	401046	732902	612144	1268618
RSD (%)	2,9	4,2	7,9	2,5	2,0	4,6	5,4	3,2	4,8
XL (mg L ⁻¹)	0,5878	2,9392	5,8784	13,2264	20,5743	29,3919	36,7399	41,1486	
Áreas GC	418450	2301638	4149372	9872531	17395781	26984112	33514637	37689720	
	488335	2335784	4508076	10236870	16667663	26336858	33136569	36959630	
Média	453392,5	2318711	4328724	10054700,5	17031722	26660485	33325603	37324675	
DesvioP	49416	24145	253642	257627	514857	457678	267334	516252	
RSD (%)	10,9	1,0	5,9	2,6	3,0	1,7	0,8	1,4	
Área (Yical)	5,14E+05	2,57E+06	5,14E+06	1,16E+07	1,80E+07	2,57E+07	3,21E+07	3,60E+07	



Rectas de calibração obtidas em modo isotérmico a 200 °C

BTEoX a 40 °C:

BZ (mg L ⁻¹)	0,0741	0,1852	0,3704	0,7407	1,4814	3,3332	5,1850	7,4071	12,9624	18,5177
Áreas GC	73086	152883	301856	703825	1226647	3026769	5134447	7053484	13031710	16968460
Média (Yi)	72837,5	157527,5	311973	677906	1192055	2870472	5146410,5	7157306	12396605	17882215
DesvioP	351	6568	14308	36655	48920	221037	16919	146826	898175	1292245
RSD (%)	0,5	4,2	4,6	5,4	4,1	7,7	0,3	2,1	7,2	7,2
TL (mg L ⁻¹)	0,0735	0,1837	0,3674	0,7348	1,4696	3,3066	5,1436	7,3480	12,8590	18,3699
Áreas GC	70113	137149	273105	666986	1188250	3003889	5001066	6907553	12634156	15972660
Média	68134,5	139606	281706	653926	1179536,5	2860162	5078274,5	6903147,5	12237974	16936905
DesvioP	2798	3475	12164	18470	12323	203261	109189	6230	560287	1363648
RSD (%)	4,1	2,5	4,3	2,8	1,0	7,1	2,2	0,1	4,6	8,1
ET (mg L ⁻¹)	0,0731	0,1829	0,3657	0,7314	1,4628	3,2914	5,1199	7,3142	12,7998	18,2855
Áreas GC	60969	104495	223980	501076	927831	2361639	3906726	5338487	9382501	12278396
Média	60044	107650	232199,5	513635	946063	2260066,5	3993478	5369183	9338633	12829856
DesvioP	1308	4462	11624	17761	25784	143645	122686	43411	62039	779882
RSD (%)	2,2	4,1	5,0	3,5	2,7	6,4	3,1	0,8	0,7	6,1
oXL (mg L ⁻¹)	0,0743	0,1858	0,3716	0,7432	1,4865	3,3446	5,2027	7,4324	13,0068	18,5811
Áreas GC	45565	78285	181729	437385	854706	2236932	3660765	5030204	8637869	11736282
Média	46312	86775	198197	455644	881720,5	2147775,5	3758638	5053984,5	8745659,5	12091440
DesvioP	1056	12007	23289	25822	38204	126086	138413	33631	152439	502269
RSD (%)	2,3	13,8	11,8	5,7	4,3	5,9	3,7	0,7	1,7	4,2



Limites de detecção e de quantificação

	B (200°C)	T (200°C)	E (200°C)	X (200°C)	BTEoX (200°C)
	Área	Área	Área	Área	Área
1	183816	304215	509199	370915	483865
2	182300	319064	623816	357893	437139
3	168650	318956	493953	393451	465610
4	183235	291350	397003	329503	458309
5	171509	307602	463600	439832	437966
6	191069	306064	509769	404120	401168
7	201243	303541	429243	337532	494406
8	187252	320884	420621	358758	477824
9	188500	295313	603979	324974	431551
10	169458	317064	633674	342708	464802
Desvio Padrão	10370,5	10356,2	86118,9	36770,0	28250,4
Tempo detecção (min,)	2,12	2,16	2,19	2,22	2,18
Declive Curva Calibração	836539	793285	1000000	648301	909450
LOD	0,0371908	0,0391644	0,2583568	0,1701523	0,0931896
LOQ	0,1239692	0,1305481	0,8611894	0,5671745	0,3106318
Declive Curva Calibração	927679			873826	
LOD	0,0335369			0,1262379	
LOQ	0,1117898			0,4207929	
Declive Curva Calibração	830232			601257	
LOD	0,0374733			0,1834655	
LOQ	0,124911			0,6115518	
Declive Curva Calibração				599722	
LOD				0,184	
LOQ				0,613	
Declive Curva Calibração				538866	
LOD				0,205	
LOQ				0,682	
BTEoX (40°C)					
	B (40°C)	T (40°C)	E (40°C)	X (40°C)	
	Área	Área	Área	Área	
1	167638	164015	169902	157008	
2	156399	153188	143808	143014	
3	164317	149822	150228	159803	
4	179856	186183	168778	178396	
5	155056	158365	140179	143080	
6	165606	171616	151252	151638	
7	176442	180116	162328	165901	
8	151448	155641	138070	142615	
9	174251	177745	154813	162519	
10	164860	167102	151142	154436	
Desvio Padrão	9416,8	12343,7	11109,9	11515,8	
Tempo detecção (min,)	3,14	5,82	10,99	13,85	
Declive Curva Calibração	961766	933146	715294	677520	
LOD	0,029	0,040	0,047	0,051	
LOQ	0,098	0,132	0,155	0,170	

ANEXO III - ISOTÉRMICAS

Calcário com Benzeno $V_{\text{gas}} = 794 \text{ cm}^3$; $V_{\text{água}} = 70 \text{ mL}$; $M_{\text{solo}} = 630 \text{ g}$; $H = 0,232$											
M_{BZ} (mg)	Áreas GC		Média	SD	RSD	C_{gas} (mg L ⁻¹)	M_{gas} (mg)	C_{aq} (mg L ⁻¹)	M_{aq} (mg)	C_{soil} (mg kg ⁻¹)	M_{soil} (mg)
0,35	94610	92392	93501	1568,4	1,7	0,11	0,09	0,49	0,03	0,36	0,23
1,75	389891	396369	393130	4580,6	1,2	0,47	0,38	2,04	0,14	1,96	1,24
4,39	1080776	1122721	1101748,5	29659,6	2,7	1,33	1,05	5,72	0,40	4,65	2,93
8,77	2529399	2261035	2395217	189762,0	7,9	2,88	2,29	12,44	0,87	8,90	5,61
17,54	5526023	5234532	5380277,5	206115,3	3,8	6,48	5,15	27,93	1,96	16,57	10,44
30,70	12724908	12004332	12364620	509524,2	4,1	14,89	11,83	64,19	4,49	22,82	14,38
52,62	23938178	25171542	24554860	872120,0	3,6	29,58	23,48	127,48	8,92	32,08	20,21
78,93	44522438	46088997	45305718	1107724,5	2,4	54,57	43,33	235,22	16,47	30,38	19,14
109,63	57454694	54415473	55935084	2149053,8	3,8	67,37	53,49	290,40	20,33	56,83	35,80
153,48	77920459	77654119	77787289	188330,8	0,2	93,69	74,39	403,85	28,27	80,66	50,81

Calcário com Tolueno $V_{\text{gas}} = 794 \text{ cm}^3$; $V_{\text{água}} = 70 \text{ mL}$; $M_{\text{solo}} = 630 \text{ g}$; $H = 0,276$											
M_{TL} (mg)	Áreas GC		Média	SD	RSD	C_{gas} (mg L ⁻¹)	M_{gas} (mg)	C_{aq} (mg L ⁻¹)	M_{aq} (mg)	C_{soil} (mg kg ⁻¹)	M_{soil} (mg)
0,35	42348	41487	41917,5	608,8	1,5	0,05	0,04	0,19	0,01	0,46	0,29
1,74	221598	206050	213824	10994,1	5,1	0,27	0,21	0,98	0,07	2,31	1,46
4,35	645868	588544	617206	40534,2	6,6	0,78	0,62	2,82	0,20	5,61	3,53
8,70	1163506	1245493	1204499,5	57973,6	4,8	1,52	1,21	5,50	0,39	11,28	7,11
17,40	3531532	3577098	3554315	32220,0	0,9	4,48	3,56	16,23	1,14	20,17	12,71
30,45	8303230	8034527	8168878,5	190001,7	2,3	10,30	8,18	37,31	2,61	31,21	19,66
52,20	17597773	18186184	17891979	416069,4	2,3	22,55	17,91	81,72	5,72	45,35	28,57
78,30	28513252	28526513	28519883	9376,9	0,0	35,95	28,55	130,26	9,12	64,50	40,64
108,75	37537507	37615069	37576288	54844,6	0,1	47,37	37,61	171,62	12,01	93,85	59,13
152,25	51538545	55466325	53502435	2777359,9	5,2	67,44	53,55	244,36	17,11	129,51	81,59

Calcário com Etilbenzeno $V_{\text{gas}} = 794 \text{ cm}^3$; $V_{\text{água}} = 70 \text{ mL}$; $M_{\text{solo}} = 630 \text{ g}$; $H = 0,349$											
M_{ET} (mg)	Áreas GC		Média	SD	RSD	C_{gas} (mg L ⁻¹)	M_{gas} (mg)	C_{aq} (mg L ⁻¹)	M_{aq} (mg)	C_{soil} (mg kg ⁻¹)	M_{soil} (mg)
0,35	49147	50293	49720	810,3	1,6	0,05	0,04	0,14	0,01	0,47	0,30
1,73	161057	150034	155545,5	7794,4	5,0	0,16	0,12	0,45	0,03	2,50	1,58
4,33	422732	366331	394531,5	39881,5	10,1	0,39	0,31	1,13	0,08	6,25	3,94
8,66	762562	745436	753999	12109,9	1,6	0,75	0,60	2,16	0,15	12,56	7,91
17,32	2289522	2349147	2319334,5	42161,2	1,8	2,32	1,84	6,65	0,47	23,83	15,01
30,31	3455985	3378125	3417055	55055,3	1,6	3,42	2,71	9,79	0,69	42,72	26,91
51,96	8784104	7892642	8338373	630358,8	7,6	8,34	6,62	23,89	1,67	69,31	43,67
77,94	17211405	18487525	17849465	902353,1	5,1	17,85	14,17	51,14	3,58	95,54	60,19
108,25	27454046	27521554	27487800	47735,4	0,2	27,49	21,83	78,76	5,51	128,43	80,91
151,55	34429877	33551685	33990781	620975,5	1,8	33,99	26,99	97,39	6,82	186,89	117,74

Calcário com Xileno $V_{\text{gas}} = 794 \text{ cm}^3$; $V_{\text{água}} = 70 \text{ mL}$; $M_{\text{solo}} = 630 \text{ g}$; $H = 0,271$											
M_{XL} (mg)	Áreas GC		Média	SD	RSD	C_{gas} (mg L ⁻¹)	M_{gas} (mg)	C_{aq} (mg L ⁻¹)	M_{aq} (mg)	C_{soil} (mg kg ⁻¹)	M_{soil} (mg)
0,34	130430	121488	125959	6322,9	5,0	0,14	0,11	0,53	0,04	0,31	0,19
1,72	254285	222127	238206	22739,1	9,5	0,27	0,22	1,01	0,07	2,27	1,43
4,30	445121	467787	456454	16027,3	3,5	0,52	0,41	1,93	0,13	5,95	3,75
12,90	1160174	1071430	1115802	62751,5	5,6	1,28	1,01	4,71	0,33	18,34	11,56
25,80	2663247	2700259	2681753	26171,4	1,0	3,07	2,44	11,32	0,79	35,83	22,57
38,70	4050909	4241114	4146011,5	134495,2	3,2	4,74	3,77	17,51	1,23	53,50	33,71
64,50	7968150	8373304	8170727	286487,1	3,5	9,35	7,42	34,50	2,42	86,76	54,66
107,50	15669253	16778926	16224090	784657,3	4,8	18,57	14,74	68,51	4,80	139,62	87,96
150,50	21676456	23477703	22577080	1273674,0	5,6	25,84	20,51	95,34	6,67	195,73	123,31

Calcário com BTEoX $V_{\text{gas}} = 794 \text{ cm}^3$; $V_{\text{água}} = 70 \text{ mL}$; $M_{\text{solo}} = 630 \text{ g}$; $H = 0,268$											
M_{BTEoX} (mg)	Áreas GC		Média	SD	RSD	C_{gas} (mg L ⁻¹)	M_{gas} (mg)	C_{aq} (mg L ⁻¹)	M_{aq} (mg)	C_{soil} (mg kg ⁻¹)	M_{soil} (mg)
0,4	186920	185523	186221,5	987,8	0,5	0,20	0,16	0,76	0,05	0,21	0,13
2	399019	389697	394358	6591,6	1,7	0,43	0,34	1,62	0,11	2,04	1,28
5	782217	748012	765114,5	24186,6	3,2	0,84	0,67	3,14	0,22	5,50	3,46
15	1589478	1660387	1624932,5	50140,2	3,1	1,79	1,42	6,67	0,47	17,72	11,16
30	3468012	3669602	3568807	142545,7	4,0	3,92	3,12	14,64	1,02	34,86	21,96
45	7114033	7044864	7079448,5	48909,9	0,7	7,78	6,18	29,05	2,03	49,10	30,94
75	14442904	14756605	14599755	221820,1	1,5	16,05	12,75	59,90	4,19	76,68	48,31
125	25669253	26778926	26224090	784657,3	3,0	28,84	22,90	107,59	7,53	124,32	78,32
175	40516596	32514339	36515468	5658450,2	15,5	40,15	31,88	149,82	10,49	174,42	109,88

Granito com benzeno $V_{\text{gas}} = 746 \text{ cm}^3$; $V_{\text{água}} = 140 \text{ mL}$; $M_{\text{solo}} = 560 \text{ g}$; $H = 0,232$											
M_{BZ} (mg)	Áreas GC		Média	SD	RSD	C_{gas} (mg L ⁻¹)	M_{gas} (mg)	C_{aq} (mg L ⁻¹)	M_{aq} (mg)	C_{soil} (mg kg ⁻¹)	M_{soil} (mg)
0,35	208659	213576	211117,5	3476,8	1,6	0,25	0,19	1,08	0,15	0,02	0,01
1,75	990226	940160	965193	35402,0	3,7	1,16	0,87	5,01	0,70	0,33	0,19
4,39	2146848	1970818	2058833	124472,0	6,0	2,48	1,85	10,69	1,50	1,85	1,04
13,16	5655386	5537532	5596459	83335,4	1,5	6,74	5,03	29,06	4,07	7,25	4,06
26,31	11698221	10896651	11297436	566795,6	5,0	13,61	10,15	58,65	8,21	14,19	7,95
39,47	18981278	19221657	19101468	169973,6	0,9	23,01	17,16	99,17	13,88	15,03	8,42
65,78	36577630	34914318	35745974	1176139,2	3,3	43,06	32,12	185,58	25,98	13,70	7,67
109,63	59610093	59424271	59517182	131396,0	0,2	71,69	53,48	309,00	43,26	23,01	12,89
153,48	80334997	79200529	79767763	802190,0	1,0	96,08	71,67	414,13	57,98	42,54	23,82

Granito com tolueno V _{gas} = 746 cm ³ ; V _{água} = 140 mL; M _{solo} = 560 g; H = 0,276											
M _{TL} (mg)	Áreas GC		Média	SD	RSD	C _{gas} (mg L ⁻¹)	M _{gas} (mg)	C _{aq} (mg L ⁻¹)	M _{aq} (mg)	C _{soil} (mg kg ⁻¹)	M _{soil} (mg)
0,35	209489	202466	205977,5	4966,0	2,4	0,26	0,19	0,94	0,13	0,04	0,02
1,74	1070064	995645	1032854,5	52622,2	5,1	1,30	0,97	4,72	0,66	0,19	0,11
4,35	2460368	2274040	2367204	131753,8	5,6	2,98	2,23	10,81	1,51	1,09	0,61
8,70	4831213	4836948	4834080,5	4055,3	0,1	6,09	4,55	22,08	3,09	1,90	1,06
17,40	8762931	9424052	9093491,5	467483,1	5,1	11,46	8,55	41,53	5,81	5,42	3,03
30,45	18531949	17126488	17829219	993811,0	5,6	22,48	16,77	81,43	11,40	4,08	2,28
52,20	30220124	30791816	30505970	404247,3	1,3	38,46	28,69	139,35	19,51	7,14	4,00
78,30	47263552	50216418	48739985	2087991,6	4,3	61,44	45,83	222,61	31,17	2,32	1,30
108,75	60206659	59341536	59774098	611734,3	1,0	75,35	56,21	273,01	38,22	25,57	14,32
152,25	86857887	87917837	87387862	749497,8	0,9	110,16	82,18	399,13	55,88	25,34	14,19

Granito com etilbenzeno V _{gas} = 746 cm ³ ; V _{água} = 140 mL; M _{solo} = 560 g; H = 0,349											
M _{ET} (mg)	Áreas GC		Média	SD	RSD	C _{gas} (mg L ⁻¹)	M _{gas} (mg)	C _{aq} (mg L ⁻¹)	M _{aq} (mg)	C _{soil} (mg kg ⁻¹)	M _{soil} (mg)
0,35	170218	169997	170107,5	156,3	0,1	0,17	0,13	0,49	0,07	0,27	0,15
1,73	833996	873583	853789,5	27992,2	3,3	0,85	0,64	2,45	0,34	1,34	0,75
4,33	1997916	2070495	2034205,5	51321,1	2,5	2,03	1,52	5,83	0,82	3,57	2,00
8,66	4631856	4149101	4390478,5	341359,3	7,8	4,39	3,28	12,58	1,76	6,47	3,62
17,32	10018750	10551524	10285137	376728,1	3,7	10,29	7,67	29,47	4,13	9,86	5,52
30,31	15573380	14801693	15187537	545665,1	3,6	15,19	11,33	43,52	6,09	23,01	12,89
51,96	24789601	24767498	24778550	15629,2	0,1	24,78	18,48	71,00	9,94	42,03	23,54
77,94	44329315	47443779	45886547	2202258,6	4,8	45,89	34,23	131,48	18,41	45,18	25,30
108,25	53764413	51154098	52459256	1845771,4	3,5	52,46	39,13	150,31	21,04	85,84	48,07
151,55	62411714	64123775	63267745	1210609,9	1,9	63,27	47,20	181,28	25,38	141,02	78,97

Granito com xileno V _{gas} = 746 cm ³ ; V _{água} = 140 mL; M _{solo} = 560 g; H = 0,271											
M _{XL} (mg)	Áreas GC		Média	SD	RSD	C _{gas} (mg L ⁻¹)	M _{gas} (mg)	C _{aq} (mg L ⁻¹)	M _{aq} (mg)	C _{soil} (mg kg ⁻¹)	M _{soil} (mg)
0,34	205926	190251	198088,5	11083,9	5,6	0,23	0,17	0,85	0,12	0,10	0,05
1,72	609192	589387	599289,5	14004,2	2,3	0,69	0,51	2,53	0,35	1,53	0,85
4,30	1236296	1121977	1179136,5	80835,7	6,9	1,35	1,01	4,98	0,70	4,64	2,60
12,90	3837115	4071220	3954167,5	165537,2	4,2	4,53	3,38	16,70	2,34	12,83	7,19
25,80	6939947	7012632	6976289,5	51396,1	0,7	7,98	5,96	29,46	4,12	28,07	15,72
38,70	9554388	10265418	9909903	502774,1	5,1	11,34	8,46	41,85	5,86	43,54	24,38
64,50	14480376	14890731	14685554	290164,8	2,0	16,81	12,54	62,01	8,68	77,29	43,28
107,50	22033359	22994166	22513763	679393,1	3,0	25,76	19,22	95,07	13,31	133,87	74,97
150,50	28633324	28139933	28386629	348880,1	1,2	32,49	24,23	119,87	16,78	195,51	109,48

Granito com BTEoX Vgas = 746 cm³; Vágua = 140 mL; M _{solo} = 560 g; H = 0,265											
M _{BTEoX} (mg)	Áreas GC		Média	SD	RSD	Cgas (mg L ⁻¹)	Mgas (mg)	Caq (mg L ⁻¹)	Maq (mg)	Csoil (mg kg ⁻¹)	Msoil (mg)
0,35	179694	184122	181908	3131,1	1,7	0,20	0,15	0,75	0,10	0,17	0,09
1,74	889896	937511	913703,5	33668,9	3,7	1,00	0,75	3,75	0,52	0,83	0,47
4,35	1445836	1440716	1443276	3620,4	0,3	1,59	1,18	5,92	0,83	4,17	2,34
13,05	4928742	4809636	4869189	84220,7	1,7	5,35	3,99	19,98	2,80	11,18	6,26
26,10	10085660	10397741	10241701	220674,6	2,2	11,26	8,40	42,02	5,88	21,10	11,82
39,15	15707304	14429711	15068508	903394,7	6,0	16,57	12,36	61,82	8,66	32,38	18,13
65,25	21411505	20223684	20817595	839916,3	4,0	22,89	17,08	85,41	11,96	64,67	36,22
108,75	28142437	28411575	28277006	190309,3	0,7	31,09	23,19	116,02	16,24	123,77	69,31
152,25	41888874	35335964	38612419	4633607,1	12,0	42,46	31,67	158,42	22,18	175,71	98,40

Xisto com benzeno V _{gas} = 789 cm ³ ; V _{água} = 88 mL; M _{solo} = 612 g; H = 0,232											
M _{BZ} (mg)	Áreas GC		Média	SD	RSD	C _{gas} (mg L ⁻¹)	M _{gas} (mg)	C _{aq} (mg L ⁻¹)	M _{aq} (mg)	C _{soil} (mg kg ⁻¹)	M _{soil} (mg)
0,44	214348	215109	214728,5	538,1	0,3	0,26	0,20	1,11	0,10	0,22	0,14
1,75	1002403	1103360	1052881,5	71387,4	6,8	1,27	1,00	5,47	0,48	0,45	0,27
4,39	2344855	2284768	2314811,5	42487,9	1,8	2,79	2,20	12,02	1,06	1,84	1,13
8,77	5007990	4994747	5001368,5	9364,2	0,2	6,02	4,75	25,97	2,28	2,83	1,73
17,54	10649960	10094585	10372273	392709,4	3,8	12,49	9,86	53,85	4,74	4,81	2,94
30,70	19143412	18497379	18820396	456814,3	2,4	22,67	17,89	97,71	8,60	6,88	4,21
52,62	36299450	36185845	36242648	80330,9	0,2	43,65	34,44	188,16	16,56	2,65	1,62
78,93	51763314	53039753	52401534	902578,7	1,7	63,12	49,80	272,05	23,94	8,48	5,19
109,63	72751077	70893830	71822454	1313271,9	1,8	86,51	68,26	372,88	32,81	13,98	8,56
153,48	95537203	98758742	97147973	2277972,1	2,3	117,01	92,32	504,37	44,38	27,40	16,77

Xisto com tolueno Vgas = 789 cm³; Vágua = 88 mL; M _{solo} = 612 g; H = 0,276											
M _{TL} (mg)	Áreas GC		Média	SD	RSD	Cgas (mg L ⁻¹)	Mgas (mg)	Caq (mg L ⁻¹)	Maq (mg)	Csoil (mg kg ⁻¹)	Msoil (mg)
0,35	241505	234722	238113,5	4796,3	2,0	0,30	0,24	1,09	0,10	0,03	0,02
1,74	1205548	1233746	1219647	19939,0	1,6	1,54	1,22	5,58	0,49	0,06	0,03
4,35	2966321	2715004	2840662,5	177708,0	6,3	3,58	2,83	12,97	1,14	0,63	0,38
8,70	5939812	5581116	5760464	253636,4	4,4	7,26	5,73	26,31	2,32	1,07	0,66
17,40	11757857	11880368	11819113	86628,4	0,7	14,90	11,76	53,98	4,75	1,46	0,89
30,45	18589199	17953527	18271363	449488,0	2,5	23,03	18,17	83,45	7,34	8,06	4,93
52,20	34638276	34428900	34533588	148051,2	0,4	43,53	34,35	157,73	13,88	6,49	3,97
78,30	53203613	54119845	53661729	647873,9	1,2	67,64	53,37	245,09	21,57	5,49	3,36
108,75	70663232	68504041	69583637	1526778,6	2,2	87,72	69,21	317,81	27,97	18,91	11,57
152,25	88477527	87302143	87889835	831122,0	0,9	110,79	87,42	401,42	35,33	48,22	29,51

Xisto com etilbenzeno V _{gas} = 789 cm ³ ; V _{água} = 88 mL; M _{solo} = 612 g; H = 0,349											
M _{ET} (mg)	Áreas GC		Média	SD	RSD	C _{gas} (mg L ⁻¹)	M _{gas} (mg)	Ca _q (mg L ⁻¹)	Ma _q (mg)	C _{soil} (mg kg ⁻¹)	M _{soil} (mg)
0,35	213423	219306	216364,5	4159,9	1,9	0,22	0,17	0,62	0,05	0,20	0,12
1,73	1048924	1101059	1074991,5	36865,0	3,4	1,07	0,85	3,08	0,27	1,00	0,61
4,33	2720028	2967169	2843598,5	174755,1	6,1	2,84	2,24	8,15	0,72	2,24	1,37
8,66	5497838	5649965	5573901,5	107570,0	1,9	5,57	4,40	15,97	1,41	4,67	2,86
17,32	10966106	10235716	10600911	516463,7	4,9	10,60	8,36	30,38	2,67	10,27	6,28
30,31	19235845	20331380	19783613	774660,2	3,9	19,78	15,61	56,69	4,99	15,87	9,71
51,96	33745141	32707196	33226169	733937,9	2,2	33,23	26,22	95,20	8,38	28,38	17,37
77,94	48724144	48136198	48430171	415740,6	0,9	48,43	38,21	138,77	12,21	44,96	27,52
108,25	53725855	53150496	53438176	406840,3	0,8	53,44	42,16	153,12	13,47	85,97	52,61
151,55	63765786	64238320	64002053	334132,0	0,5	64,00	50,50	183,39	16,14	138,75	84,91

Xisto com xileno V _{gas} = 789 cm ³ ; V _{água} = 88 mL; M _{solo} = 612 g; H = 0,271											
M _{XL} (mg)	Áreas GC		Média	SD	RSD	C _{gas} (mg L ⁻¹)	M _{gas} (mg)	Ca _q (mg L ⁻¹)	Ma _q (mg)	C _{soil} (mg kg ⁻¹)	M _{soil} (mg)
0,34	264432	262351	263391,5	1471,5	0,6	0,30	0,24	1,11	0,10	0,02	0,01
1,72	685340	672623	678981,5	8992,3	1,3	0,78	0,61	2,87	0,25	1,40	0,85
4,30	1575641	1484020	1529830,5	64785,8	4,2	1,75	1,38	6,46	0,57	3,84	2,35
12,90	4966382	4865036	4915709	71662,4	1,5	5,63	4,44	20,76	1,83	10,84	6,63
25,80	8002165	8123352	8062758,5	85692,1	1,1	9,23	7,28	34,05	3,00	25,37	15,52
38,70	11711183	11958419	11834801	174822,3	1,5	13,54	10,69	49,98	4,40	38,59	23,62
64,50	15238157	16468730	15853444	870146,5	5,5	18,14	14,31	66,95	5,89	72,38	44,29
107,50	25981560	27558141	26769851	1114811,1	4,2	30,64	24,17	113,05	9,95	119,90	73,38
150,50	33973134	34845486	34409310	616846,0	1,8	39,38	31,07	145,31	12,79	174,26	106,64

Xisto com BTEoX V _{gas} = 789 cm ³ ; V _{água} = 88 mL; M _{solo} = 612 g; H = 0,265											
M _{BTEoX} (mg)	Áreas GC		Média	SD	RSD	C _{gas} (mg L ⁻¹)	M _{gas} (mg)	Ca _q (mg L ⁻¹)	Ma _q (mg)	C _{soil} (mg kg ⁻¹)	M _{soil} (mg)
0,35	241764	228998	235381	9026,9	3,8	0,26	0,20	0,97	0,08	0,10	0,06
1,74	600608	591795	596201,5	6231,7	1,0	0,66	0,52	2,45	0,22	1,65	1,01
4,35	1384414	1278421	1331417,5	74948,4	5,6	1,46	1,16	5,46	0,48	4,43	2,71
13,05	3345069	3583864	3464466,5	168853,6	4,9	3,81	3,01	14,21	1,25	14,37	8,79
26,10	6799962	6912449	6856205,5	79540,3	1,2	7,54	5,95	28,13	2,48	28,88	17,68
39,15	8823660	8172754	8498207	460260,0	5,4	9,34	7,37	34,87	3,07	46,91	28,71
65,25	13721927	14409738	14065833	486355,8	3,5	15,47	12,20	57,71	5,08	78,38	47,97
108,75	35450908	32561893	34006401	2042842,1	6,0	37,39	29,50	139,52	12,28	109,43	66,97
152,25	48949001	39890243	44419622	6405509,2	14,4	48,84	38,54	182,25	16,04	159,60	97,68

Considerações sobre o ajuste à equação da isotérmica de Langmuir

A isotérmica de Langmuir é representada pela equação

$$y = k \frac{b \cdot x}{1 + b \cdot x}$$

sendo k o valor limite assintótico ou valor de equilíbrio, uma vez que $\lim_{x \rightarrow \infty} y = k$ e b um parâmetro de forma.

A determinação dos parâmetros (k,b) a partir de um conjunto de pontos experimentais (x_i, y_i) pode ser feita por linearização da equação da isotérmica. Existem vários métodos alternativos:

1 – Método de Lineweaver-Burk

O método mais simples para determinar o valor dos parâmetros (k, b) é pela regressão linear dos valores inversos de y em função dos valores inversos de x. Na verdade

$$\frac{1}{y} = \frac{1 + b \cdot x}{k b x} = \frac{1}{k b} \cdot \frac{1}{x} + \frac{1}{k}$$

A regressão linear de 1/y em função de 1/x permite determinar o declive m da recta de regressão e a sua ordenada na origem b, sendo

$$m = \frac{1}{k \cdot b} \text{ e } b = \frac{1}{k}$$

donde se calcula os parâmetros k e b.

O método é muito pouco fidedigno pois a regressão é feita minimizando a soma dos quadrados dos resíduos obtidos entre o inverso dos valores experimentais e os produzidos pelo modelo. Introduce um elevado enviesamento, especialmente para baixas concentrações.

2 – Método de Eadie-Hofstee

A equação de Langmuir pode ser escrita na forma

$$y(1 + b \cdot x) = k \cdot b \cdot x$$

ou

$$y + y \cdot b \cdot x = k \cdot b \cdot x$$

Transformando novamente:

$$b \cdot x \cdot y = k \cdot b \cdot x - y;$$

Dividindo ambos os membros por bx, resulta:

$$y = k - \frac{y}{bx}$$

Fazendo uma regressão linear entre y e y/x obtemos o declive -1/b e a ordenada na origem k. Este método apresenta igualmente enviesamento sistemático nas baixas concentrações.

3- Método de Scatchard (1949)

A equação de Langmuir pode ser escrita na forma

$$y(1 + b \cdot x) = k \cdot b \cdot x$$

ou

$$y + b \cdot x \cdot y = k \cdot b \cdot x;$$

donde resulta

$$y = k \cdot b \cdot x - bxy$$

Dividindo ambos os membros por x resulta

$$\frac{y}{x} = k \cdot b - by = -by + kb$$

Fazendo uma regressão de y/x em função de y obtemos o declive -b e a ordenada na origem kb.

O método de Scatchard introduz enviesamento para as altas concentrações.

4- Método de Langmuir (1918)

O próprio Langmuir introduz o seu próprio método de linearização. Considere-se a equação escrita na forma

$$y(1 + b \cdot x) = k \cdot b \cdot x$$

ou

$$y + b \cdot x \cdot y = k \cdot b \cdot x$$

Dividindo ambos os membros por y, resulta

$$1 + b \cdot x = k \cdot b \cdot \frac{x}{y}$$

ou, finalmente

$$\frac{x}{y} = \frac{1}{k} \cdot x + \frac{1}{kb}$$

Fazendo uma regressão de x/y em função de x obtemos o declive 1/k e a ordenada na origem 1/kb. Este método tem muito pouca sensibilidade para erros de medida e introduz enviesamentos nas concentrações médias e altas.

5 – Método não linear - algoritmo de Gauss-Newton para o problema dos mínimos quadrados não lineares

Nestas condições deve-se utilizar uma regressão não-linear para ajuste da isotérmica de Langmuir. Nesta abordagem, conhecida por algoritmo de Gauss-Newton para o problema dos mínimos quadrados não lineares, as derivadas dos resíduos (r_i) em ordem aos parâmetros (β_j) não são apenas funções da variável independente, como no caso da regressão linear, mas são também função dos próprios parâmetros. Nestas circunstâncias as equações dos gradientes $\frac{\partial r_i}{\partial \beta_j}$ não têm uma solução fechada. Assim, devem ser escolhidos valores iniciais para os parâmetros, que são refinados iterativamente por incrementos $\Delta\beta_j$ (vector deslocamento). Em cada iteração de ordem k o modelo é linearizado por uma aproximação à 1ª ordem da expansão em série de Taylor centrada em torno de β^k . Isto implica que o Jacobiano seja uma função das constantes, das variáveis independentes e dos parâmetros, pelo que difere de iteração para iteração.

ANEXO IV - ENSAIOS DE EXPLORATÓRIOS EM MEIO LÍQUIDO

Ensaio em meio líquido – Xileno – Evolução de Cgas no tempo:

<i>1ª Transf,</i>	Início	1º Dia	3º Dia	6º Dia	8º Dia	11º Dia
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)
3T1XL34	2,29	1,98	1,01	0,99	0,17	0,08
3T1XL69	11,90	12,32	6,14	0,48	0,08	0,09
3T1XL138	21,86	20,67	11,23	0,44	0,26	0,09
3T1XL172	32,55	34,20	23,88	0,49	0,17	0,07
3T1XL206	37,79	35,41	22,13	0,50	0,17	0,14
3T1XL275	43,20	42,85	36,54	0,71	0,10	0,07
3T1XL344	63,69	65,01	63,02	60,21	59,03	40,29
<i>2ª Transf,</i>	Início	1º Dia	3º Dia	6º Dia	8º Dia	11º Dia
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)
3T2XL34	3,04	2,01	0,90	0,05	0,01	
3T2XL69	18,04	13,65	0,13	0,10	0,05	0,02
3T2XL138	23,43	20,12	0,48	0,24	0,10	0,07
3T2XL172	30,05	31,87	1,94	0,26	0,07	0,05
3T2XL206	34,50	29,15	0,17	0,12	0,10	0,08
3T2XL275	46,34	43,69	41,67	28,78	0,53	0,14

<i>1ª Transf,</i>	Início	1º Dia	2º Dia	3º Dia	4º Dia	5º Dia	6º Dia	8º Dia
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)
4T1XL138	25,58	23,71865	9,63		6,03	0,58	0,58	0,18
5T1XL138	31,47		23,65	2,14			0,94	0,21
4T1XL172	23,09	24,13293	12,89		2,37	0,48	0,28	0,18
5T1XL172	31,69		24,63	12,22			0,69	0,25
4T1XL206	22,36	24,72542	22,85		1,30	0,76	0,26	0,16
5T1XL206	29,35		22,51	19,96			0,78	0,13

<i>2ª Transf,</i>	Início	2º Dia	3º Dia	5º Dia	7º Dia
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)
4T2XL138	22,90	15,26	0,87	0,83	0,21
5T2XL138	42,33	0,70		0,15	
4T2XL172	30,63	14,73	0,82	0,92	0,43
5T2XL172	39,47	0,50		0,03	
4T2XL206	27,89	10,96	0,88	0,60	0,27
5T2XL206	33,47	18,71		0,10	

3ª Transf,	Início	1º Dia	2º Dia	3º Dia	6º Dia	8º Dia	10º Dia	11º Dia
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)
4T3XL138	41,07		8,61	7,26	0,37			
5T3XL138	34,20	16,01		3,69	0,37			
4T3XL172	43,28		37,39	29,89	24,00	33,10	2,58	0,23
5T3XL172	7,69	29,55		1,11	0,16			
4T3XL206	58,91		33,10	24,73	20,70	18,59	4,71	0,15
5T3XL206	30,88	32,46		31,33	0,16			

Ensaio em meio líquido – Xileno – Quantificação da Biomassa:

Amostra	3T1XL34	3T1XL69	3T1XL138	3T1XL172	3T1XL206	3T1XL275	3T1XL344
Biomassa (CFU/mL)	5,99E+05	6,88E+05	8,82E+05	1,60E+06	2,75E+06	4,02E+06	6,12E+04
Amostra	3T2XL34	3T2XL69	3T2XL138	3T2XL172	3T2XL206	3T2XL275	
Biomassa (CFU/mL)	2,49E+05	7,21E+05	2,19E+06	3,94E+06	6,73E+06	1,72E+06	
Amostra	4T1XL138	5T1XL138	4T1XL172	5T1XL172	4T1XL206	5T1XL206	
Biomassa (CFU/mL)	4,17E+06	4,64E+05	3,58E+06	5,35E+06	4,01E+06	2,04E+06	
Amostra	4T2XL138	5T2XL138	4T2XL172	5T2XL172	4T2XL206	5T2XL206	
Biomassa (CFU/mL)	4,57E+06	4,99E+06	7,30E+06	5,09E+06	7,43E+06	9,25E+06	
Amostra	4T3XL138	5T3XL138	4T3XL172	5T3XL172	4T3XL206	5T3XL206	
Biomassa (CFU/mL)	3,97E+05	3,50E+05	4,31E+06	5,56E+06	2,77E+06	2,32E+06	

Ensaio em meio líquido – Benzeno - Evolução de Cgas no tempo:

<i>1ª Transf,</i>	Início	1º Dia	2º Dia	3º Dia	6º Dia	8º Dia
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)
6T1BZ_70	75,53	38,69	0,18	0,15	0,12	0,10
6T1BZ_140	161,81	57,14	13,05	6,24	0,52	0,56
6T1BZ_180	108,62	86,24	17,62	7,17	2,47	0,24
6T1BZ_210	178,21	106,77	19,76	5,43	0,72	0,32
6T1BZ_280	46,50	92,13	26,80	20,01	16,36	0,09
<i>2ª Transf,</i>	Início	1º Dia	2º Dia	3º Dia		
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)		
6T2BZ_70	183,35	20,14	9,98	0,28		
6T2BZ_140	196,68	18,66	10,10	0,36		
6T2BZ_180	124,12	28,77	12,60	0,19		
6T2BZ_210	163,82	30,71	14,76	0,11		
6T2BZ_280	81,87	40,17	16,97	0,23		
<i>3ª Transf,</i>	Início	1º Dia	2º Dia	3º Dia		
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)		
6T3BZ_70	98,54	27,21	8,49	0,15		
6T3BZ_140	97,76	19,03	8,36	0,05		
6T3BZ_180	102,13	36,19	10,73	0,08		
6T3BZ_210	145,90	30,20	11,28	0,06		
6T3BZ_280	147,65	53,83	13,99	0,06		

Ensaio em meio líquido – Benzeno - Evolução de Cgas no tempo:

	Início	3º Dia	4º Dia	5º Dia	6º Dia	7º Dia	9º Dia	11º Dia
1ª Transf,	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)
7T1BZ_180	122,30	24,25	21,23	19,98	19,12	15,62	6,28	2,84
7T1BZ_210	123,45	24,48	23,98	23,30	21,18	17,74	9,25	3,05
7T1BZ_280	146,50	26,78	26,02	25,47	23,00	19,82	11,05	4,52
	Início	3º Dia	4º Dia					
2ª Transf,	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)					
7T2BZ_180	162,34	23,78	0,39					
7T2BZ_210	172,39	22,34	0,28					
7T2BZ_280	245,17	36,48	0,17					
	Início	3º Dia	4º Dia	5º Dia				
3ª Transf,	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)				
7T3BZ_180	127,85	24,35	11,57	0,36				
7T3BZ_210	135,66	23,54	10,87	0,44				
7T3BZ_280	144,02	30,24	16,98	0,31				

Ensaio em meio líquido – Benzeno - Quantificação da Biomassa:

Amostra **6T1BZ_70** **6T1BZ_140** **6T1BZ_180** **6T1BZ_210** **6T1BZ_280**
Biomassa (CFU/mL) 2,00E+03 2,30E+04 2,58E+05 2,86E+05 3,89E+05

Amostra **6T2BZ_70** **6T2BZ_140** **6T2BZ_180** **6T2BZ_210** **6T2BZ_280**
Biomassa (CFU/mL) 2,04E+05 3,96E+05 3,91E+05 3,84E+05 4,86E+05

Amostra **6T3BZ_70** **6T3BZ_140** **6T3BZ_180** **6T3BZ_210** **6T3BZ_280**
Biomassa (CFU/mL) 8,57E+04 1,33E+05 2,65E+05 3,23E+05 4,14E+05

Amostra **7T1BZ_180** **7T1BZ_210** **7T1BZ_280** **7T2BZ_180** **7T2BZ_210** **7T2BZ_280**
Biomassa (CFU/mL) 4,99E+05 5,93E+05 6,36E+05 7,47E+05 7,80E+05 9,59E+05

ANEXO V - ENSAIOS DE EXPLORATÓRIOS EM SOLO

Ensaio de bio-remediação em frascos – Xileno - Evolução de Cgas no tempo:

<i>Tempo (dias)</i>	FSR70XL(20)	FSR86XL(20)	FSR103XL(20)	FSR70XL(26)	FSR86XL(26)	FSR103XL(26)
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)
0	32,35	40,44	59,13	43,27	36,23	51,67
2	19,43	33,80	38,65	10,49	28,16	38,66
3	2,14	28,79	35,97	3,07	15,55	36,18
4	1,60	22,26	35,77	1,30	4,44	34,17
6	1,01	17,54	29,22	0,50	0,81	24,27
7	1,01	17,24	25,58	0,34	0,75	14,42
8	0,49	1,18	26,96	0,29	0,59	9,30
9	0,53	0,88	26,02	0,46	0,59	0,89
10	0,23	0,48	20,95	0,17	0,36	0,82
12	0,18	0,32	21,66	0,12	0,18	0,51
13			18,77	0,17	0,19	0,48
15			19,13			0,50
16			18,39			0,23
17			16,63			
20			7,25			
21			3,02			
23			1,39			
24			0,46			
27			0,46			
29			0,26			

<i>Tempo (dias)</i>	FBSR70XL(20)	FBSR86XL(20)	FBSR103XL(20)	FBSR70XL(26)	FBSR86XL(26)	FBSR103XL(26)
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)
0	58,53	45,50	35,54	58,53	45,50	35,54
2	19,70	29,09	33,76	19,70	29,09	33,76
3	18,83	25,15	35,49	18,83	25,15	35,49
4	16,35	26,02	34,55	16,35	26,02	34,55
6	20,83	26,12	26,33	20,83	26,12	26,33
7	15,68	23,28	26,62	15,68	23,28	26,62
8	18,00	25,69	23,01	18,00	25,69	23,01
9	16,73	25,02	26,06	16,73	25,02	26,06
10	13,47	19,60	27,09	13,47	19,60	27,09
12	12,60	13,41	24,00	12,60	13,41	24,00
13	12,04	13,77	22,62	12,04	13,77	22,62
15			21,15	12,04	13,77	21,15
16			21,78	12,04	13,77	21,78
17			21,96			
20			15,03			
21			15,14			
23			22,88			
24			23,55			
27			27,25			
29			27,70			

Tempo (dias)	FBESR103XL(25)	FBSRXL103(25)	FSR103XL(25)_1	FSR103XL(25)_2
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)
0	39,13	39,54	32,23	71,11
2	38,65	38,76	35,94	41,37
3	35,97	35,49	36,39	35,97
4	35,77	34,55	33,44	34,89
6	29,22	26,33	23,07	25,47
7	25,58	26,62	21,77	20,66
8	26,96	23,01	17,70	18,70
9	26,02	26,06	6,98	7,08
10	27,95	27,09	2,87	2,89
12	27,66	24,00	0,78	0,79
13	25,77	24,62	0,72	0,77
15	26,25	25,15	0,50	0,24
17	26,99	25,78	0,23	0,24

Tempo (dias)	FBECL103XL(25)	FBCLXL103(25)	FCL103XL(25)_1	FCL103XL(25)_2
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)
0	46,58	46,34	43,44	41,80
1	22,02	19,26	27,01	23,74
2	14,34	14,18	12,29	12,73
4	11,65	12,46	11,51	10,68
6	11,42	11,02	10,87	9,93
8	11,23	12,05	10,53	8,91
10	10,57	10,11	6,99	5,49
12	9,66	9,60	6,58	1,92
14	10,40	9,60	3,51	0,70
16	11,58	9,70	0,95	0,25
19	9,73	9,58	0,43	0,15
20	9,89	9,89	0,24	0,19

Tempo (dias)	FBEXT103XL(25)	FBXTXL103(25)	FXT103XL(25)_1	FXT103XL(25)_2
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)
0	43,98	50,27	53,59	44,16
2	45,26	47,49	33,19	47,38
4	35,96	38,76	35,90	36,12
6	35,28	38,90	27,38	25,85
8	34,60	35,92	2,69	2,23
10	37,80	35,35	1,38	1,35
12	37,40	40,54	0,43	0,96
14	40,71	38,00	0,16	0,72
16	37,53	36,48	0,12	0,41

Ensaio de bio-remediação em frascos – Xileno – Eficiência no final do ensaio:

	Cgas final (mg L ⁻¹)	Csoil final (mg kg ⁻¹)	Mt (mg)	Mgas (mg)	Ms (mg)	Ef (%)
FSR70XL(20)	0,18	0,38	14,00	0,09	0,08	98,83
FSR86XL(20)	0,32	0,76	17,20	0,16	0,15	98,19
FSR103XL(20)	0,26	0,59	20,60	0,13	0,12	98,81
FSR70XL(26)	0,17	0,34	14,00	0,08	0,07	98,93
FSR86XL(26)	0,20	0,42	17,20	0,10	0,08	98,96
FSR103XL(26)	0,23	0,51	20,60	0,11	0,10	98,94

	Cgas final (mg L ⁻¹)	Csoil final (mg kg ⁻¹)	Mt (mg)	Mgas (mg)	Ms (mg)	Ef (%)
FSR103XL(25)_1	0,23	0,51	41,20	0,21	0,21	98,99
FSR103XL(25)_2	0,24	0,53	41,20	0,21	0,21	98,97

	Cgas final (mg L ⁻¹)	Csoil final (mg kg ⁻¹)	Mt (mg)	Mgas (mg)	Ms (mg)	Ef (%)
FCL103XL(25)_1	0,24	2,15	41,20	0,22	0,86	97,39
FCL103XL(25)_2	0,19	1,73	41,20	0,17	0,69	97,91

	Cgas final (mg L ⁻¹)	Csoil final (mg kg ⁻¹)	Mt (mg)	Mgas (mg)	Ms (mg)	Ef (%)
FXT103XL(25)_1	0,12	0,07	41,20	0,11	0,03	99,65
FXT103XL(25)_2	0,41	0,34	41,20	0,38	0,14	98,75

Ensaio de bio-remediação em frasco – Xileno - Quantificação da Biomassa:

Amostra	FSR70XL(20)	FSR86XL(20)	FSR103XL(20)	FSR70XL(26)	FSR86XL(26)	FSR103XL(26)
Biomassa (CFU/mL)	1,86E+05	2,75E+05	3,07E+05	2,69E+05	2,79E+05	4,90E+05

Amostra	FBESR103XL(25)	FBSR103XL(25)	FSR103XL(25)_1	FSR103XL(25)_2
Biomassa (CFU/mL)	7,50E+03	2,93E+04	8,66E+05	7,04E+05

Amostra	FBECL103XL(25)	FBCL103XL(25)	FCL103XL(25)_1	FCL103XL(25)_2
Biomassa (CFU/mL)	0,00E+00	3,00E+05	8,31E+05	9,20E+05

Amostra	FBEXT103XL(25)	FBXT103XL(25)	FXT103XL(25)_1	FXT103XL(25)_2
Biomassa (CFU/mL)	4,07E+04	5,36E+05	1,57E+06	1,13E+06

Ensaio de bio-remediação em frascos – Benzeno - Evolução de Cgas no tempo:

Tempo (dias)	FBSR88BZ(25)	FBSR105BZ(25)	FBSR140BZ(25)
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)
0	28,19	37,47	44,29
2	29,00	35,42	42,03
5	26,44	32,91	36,36
7	25,38	30,12	35,00
9	23,98	26,89	31,89
12	21,97	25,00	31,23

Tempo (dias)	FSR88BZ(25)	FSR105BZ(25)	FSR140BZ(25)
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)
0	27,16	32,26	42,34
2	25,80	28,83	38,59
5	18,99	20,35	29,16
7	11,94	8,28	11,51
9	0,17	0,10	0,21

Ensaio de bio-remediação em frascos – Benzeno – Eficiência no final do ensaio:

	Cgas final (mg L ⁻¹)	Csoil final (mg kg ⁻¹)	Mt (mg)	Mgas (mg)	Ms (mg)	Ef (%)
FSR88BZ(25)	0,17	0,56	18,00	0,08	0,11	98,91
FSR105BZ(25)	0,10	0,34	21,00	0,05	0,07	99,44
FSR140BZ(25)	0,21	0,70	28,00	0,10	0,14	99,13

Ensaio de bio-remediação em frascos – Benzeno – Quantificação da biomassa:

Amostra	FBSR88BZ(25)	FSR88BZ(25)	FBSR105BZ(25)	FSR105BZ(25)	FBSR140BZ(25)	FSR140BZ(25)
Biomassa (CFU/mL)	2,12E+04	1,25E+06	2,88E+04	1,19E+06	3,02E+04	1,36E+06

Ensaio de bio-remediação em coluna – Xileno - Evolução de Cgas no tempo:

CBESR103XL		CBSR103XL		CSR103XL_1		CSR103XL_2	
<i>T</i> (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	<i>T</i> (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	<i>T</i> (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	<i>T</i> (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)
0	22,46	0	22,22	0	32,24	0	17,63
2	15,47	1	16,27	2	14,17	2	12,37
8	9,70	2	14,01	5	0,83	4	10,50
9	9,74	3	13,95	7	0,31	7	1,22
10	8,55	4	12,61	10	0,25	8	1,04
13	8,84	7	11,73			9	0,98
15	8,84	8	10,43			11	0,52
19	8,73	9	8,98			14	0,31
		11	7,04				
		13	6,09				
		15	8,07				
		17	6,62				
		19	6,89				

<i>Tempo</i> (dias)	CBSR155XL	CSR155XL_1	CSR155XL_2
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)
0	44,25	44,25	49,93
1	45,11	45,11	45,08
2		34,59	35,97
3	41,44	16,61	18,18
5	22,65	7,93	9,98
7	22,29	2,92	4,50
9	23,39	0,99	3,32
11		0,69	1,43
12	21,85	0,53	1,06
13		0,14	0,74
14		0,11	0,29
15	21,32		0,12

Tempo (dias)	CBCL155XL	CCL155XL_1	CCL155XL_2
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)
0	26,58	23,61	25,49
1	23,85	20,50	21,71
2		21,59	21,49
3	18,55	20,87	20,00
5	16,02	19,59	19,97
7	14,63	11,98	11,02
9	13,65	4,74	4,81
11		2,81	2,82
12	14,40	0,85	0,89
13		0,46	0,65
14		0,29	0,32
15	14,59	0,14	0,12

Tempo (dias)	CBXT155XL	CXT155XL_1	CXT155XL_2
	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)	Cgas (mg L ⁻¹)
0	49,93	40,97	45,60
1	35,08	49,92	43,21
2		26,59	24,88
3	34,97	16,13	14,50
5	27,51	3,14	3,32
7	26,50	1,05	1,10
9	26,49	0,69	0,73
11		0,13	0,28
12	26,78	0,10	0,16
13		0,07	0,08
15	26,64		

Ensaio de bio-remediação em coluna – Xileno – Eficiência no final do ensaio:

	Cgas final (mg L ⁻¹)	Csoil final (mg kg ⁻¹)	Mt (mg)	Mgas (mg)	Ms (mg)	Ef (%)
CSR103XL_1	0,25	0,56	206,00	0,73	1,12	99,10
CSR103XL_2	1,25	3,85	206,00	3,63	7,69	94,51
CSR155XL_1	4,25	16,64	310,00	12,33	33,29	85,29
CSR155XL_2	5,25	21,44	310,00	15,23	42,87	81,26

	Cgas final (mg L ⁻¹)	Csoil final (mg kg ⁻¹)	Mt (mg)	Mgas (mg)	Ms (mg)	Ef (%)
CCL155XL_1	0,14	1,33	310,00	0,43	2,66	99,00
CCL155XL_2	0,12	1,15	310,00	0,06	0,23	99,91

	Cgas final (mg L ⁻¹)	Csoil final (mg kg ⁻¹)	Mt (mg)	Mgas (mg)	Ms (mg)	Ef (%)
CXT155XL_1	0,07	0,03	310,00	0,21	0,07	99,91
CXT155XL_2	0,08	0,04	310,00	0,25	0,08	99,89

Ensaio de bio-remediação em coluna – Xileno – Quantificação da biomassa:

Amostra Biomassa (CFU/mL)	CBSR155XL	CSR155XL_1	CSR155XL_2	CBCL155XL	CCL155XL_1	CCL155XL_2
	3,53E+04	5,98E+05	5,45E+05	3,00E+05	9,80E+05	2,30E+06

Amostra Biomassa (CFU/mL)	CBCL155XL	CCL155XL_1	CCL155XL_2
	3,00E+05	9,80E+05	2,30E+06

Amostra Biomassa (CFU/mL)	CBXT155XL	CXT155XL_1	CXT155XL_2
	4,16E+05	5,04E+06	3,37E+06

Amostra Biomassa (CFU/mL)	CBESR103XL	CBSR103XL	CSR103XL_1	CSR103XL_2
	3,33E+03	7,23E+04	6,34E+05	7,27E+05

Ensaio de bio-remediação em coluna – Benzeno - Evolução de Cgas no tempo:

CBESR140BZ		CBSR140BZ		CSR140BZ_1		CSR140BZ_2	
<i>T</i> (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	<i>T</i> (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	<i>T</i> (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	<i>T</i> (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)
0	27,31	0	32,61	0	31,26	0	36,28
1	39,09	1	31,46	1	36,66	1	39,48
2	33,48	2	26,60	2	31,90	2	34,71
5	26,91	4	28,50	3	31,94	3	34,70
6	32,35	7	29,62	4	27,17	4	32,44
9	23,79	8	30,38	5	28,17	6	30,02
12	25,12	9	28,03	6	31,51	7	27,73
15	25,64	11	24,15	7	29,48	8	28,51
19	25,20	13	26,77	8	28,14	9	28,62
20	25,51	15	25,25	9	27,82	10	28,35
		17	24,40	10	26,75	12	25,93
		20	23,35	11	23,28	13	25,34
				13	14,66	14	22,23
				15	4,97	15	16,66
				16	0,20	16	6,59
				17	0,08	17	0,33
				18	0,06	18	0,24
				19	0,07	19	0,11

Ensaio de bio-remediação em coluna – Benzeno – Eficiência no final do ensaio:

	Cgas final (mg L ⁻¹)	Csoil final (mg kg ⁻¹)	Mt (mg)	Mgas (mg)	Ms (mg)	Ef (%)
CSR140BZ_1	0,07	0,22	280,00	0,19	0,44	99,77
CSR140BZ_2	0,11	0,38	280,00	0,33	0,75	99,62

Ensaio de bio-remediação em coluna – Benzeno – Quantificação da biomassa:

Amostra	CBESR140BZ	CBSR140BZ	CSR140BZ_1	CSR140BZ_2
Biomassa (CFU/mL)	0,00E+00	5,01E+05	1,53E+06	1,28E+06

ANEXO VI - ENSAIOS DE BIO-REMEDIAÇÃO E DE BIO-VENTILAÇÃO – DADOS EXPERIMENTAIS

T	BCL B	BbCL B	BCL T	BbCL T	BCL E	BbCL E	BCL X	BbCL X
	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas
(dias)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)
0	75,53	79,09	49,99	61,64	37,45	36,56	26,15	26,95
1	71,69	77,04	48,90	58,26	32,69	22,09	23,60	23,17
2	69,74	79,06	46,61	48,89	29,68	20,95	19,25	21,33
3	65,94	76,52	33,68	48,96	12,85	23,54	11,57	20,93
4	59,97	73,78	16,61	46,30	9,87	22,83	8,86	20,35
5	54,33	67,81	11,18	48,14	6,92	19,74	6,54	23,94
6	48,69	67,67	5,74	41,57	3,97	19,04	4,21	18,03
7	40,52	57,55	0,71	46,09	0,64	19,53	1,96	16,83
8	23,25	54,88	0,30	32,99	0,29	18,68	0,99	16,04
9	15,99	57,78	0,13	30,68	0,11	15,34	0,86	16,26
10	5,22	57,69	0,06	28,56	0,06	18,00	0,80	16,02
11	0,20	57,68		28,83		19,32	0,77	14,33
12	0,15	56,82					0,63	15,26
13	0,23	57,01					0,50	13,32
14							0,70	15,75
15							0,55	13,57
16							0,57	12,11
17							0,43	16,11
18								15,81

T	BVCL B			BVbCL B		
	Cgas	O2	CO2	Cgas	O2	CO2
(dias)	(mg L-1)	(%)	(%)	(mg L-1)	(%)	(%)
0	89,38	20,9	0,46	90,34	21,3	0,46
1	61,55	20,3	0,51	87,38	20,6	0,44
2	63,99	20,1	0,52	65,49	20,1	0,44
3	49,97	20,2	0,47	56,21	19,9	0,45
4	42,31	19,9	0,50	53,54	20,0	0,45
5	34,55	19,8	0,51	42,15	19,6	0,51
6	22,99	18,9	0,93	42,00	18,7	0,72
7	9,54	16,3	2,77	32,46	17,9	1,23
8	0,55	14,5	4,17	25,86	17,5	1,59
9	0,21	14,5	4,22	19,38	16,5	2,52
10	0,10	15,6	3,76	18,75	15,4	3,31
11	0,11	16,0	3,50	17,96	15,6	3,37

T	BVCL T			BVbCL T		
	Cgas	O2	CO2	Cgas	O2	CO2
(dias)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)
0	61,33	20,9	0,46	60,76	21,30	0,46
1	39,61	20,4	0,48	41,98	20,60	0,44
2	39,78	20,2	0,50	38,13	20,20	0,43
3	24,85	19,9	0,55	34,99	19,90	0,45
4	12,77	17,6	1,63	34,43	20,00	0,44
5	2,52	12,4	5,42	30,63	19,90	0,45
6	0,20	12,1	5,97	28,20	19,8	0,45
7	0,82	13,3	5,52	24,56	19,10	0,51
8	0,11	14,0	5,15	21,49	18,00	0,79
9	0,12	14,3	4,92	16,32	16,80	1,31
10	0,09	14,7	4,30	17,27	16,00	1,97

T	BVCL E			BVbCL E		
	Cgas	O2	CO2	Cgas	O2	CO2
(dias)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)
0	32,72	20,9	0,46	31,68	21,30	0,46
1	30,32	20,4	0,49	27,60	20,50	0,42
2	23,61	20,3	0,52	26,88	20,30	0,43
3	7,75	18,9	1,00	20,15	20,10	0,46
4	4,04	13,4	4,49	16,47	20,00	0,46
5	1,35	11,7	5,80	14,19	19,90	0,48
6	1,38	10,9	6,90	13,39	18,5	0,84
7	0,64	10,9	7,09	13,59	16,80	1,80
8	0,10	12,0	6,43	12,18	16,40	2,14
9	0,07	12,3	6,11	9,99	16,60	2,21
10	0,07	12,7	5,60	9,62	17,00	2,12

T	BVCL X			BVbCL X		
	Cgas	O2	CO2	Cgas	O2	CO2
(dias)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)
0	26,78	20,9	0,46	28,06	21,3	0,46
1	24,69	20,5	0,48	25,61	20,6	0,42
2	20,66	20,3	0,51	22,80	20,2	0,43
3	6,92	19,1	0,95	18,26	19,9	0,45
4	4,84	17,9	1,50	19,00	20,0	0,45
5	3,30	15,1	3,32	19,14	19,9	0,45
6	1,18	14,0	4,36	18,47	19,7	0,46
7	0,90	13,9	4,60	15,96	18,1	0,71
8	0,64	13,9	4,68	14,26	16,6	1,40
9	0,50	14,1	4,76	11,22	15,8	1,84
10	0,45	14,2	4,86	11,95	15,7	1,88
11	0,34	14,6	4,52	12,04	15,8	1,90

T	BCL_BTEoX	BCL_B	BCL_T	BCL_E	BCL_oX
	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas
(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)
0	78,38	23,68	21,11	19,86	13,72
1	37,85	23,54	15,87	9,74	8,71
2	8,99	4,33	0,73	2,07	1,85
3	6,52	0,62	1,54	2,28	2,08
4	1,90	0,07	0,25	1,05	0,54
5	1,44	0,07	0,19	0,89	0,29
6	0,97	0,06	0,14	0,73	0,04
7	0,71	0,07	0,08	0,49	0,07
8	0,44	0,07	0,03	0,25	0,10
9	0,42	0,01	0,02	0,28	0,11
10	0,52	0,02	0,02	0,24	0,25
11	0,53	0,02	0,02	0,24	0,25
12	0,08	0,01	0,02	0,01	0,04
13	0,07	0,01	0,01	0,01	0,04
14	0,07	0,01	0,02	0,01	0,03

T	BbCL_BTEoX	BbCL_B	BbCL_T	BbCL_E	BbCL_oX
	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas
(dias)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)
0	78,53	16,64	16,88	16,29	28,71
1	52,94	13,87	13,37	13,81	11,89
2	42,70	12,30	10,69	11,25	8,47
3	38,33	11,46	9,79	9,55	7,52
4	40,08	12,26	10,25	8,32	9,25
5	47,80	14,50	11,74	12,02	9,54
6	28,83	8,85	6,63	6,04	4,77
7	26,30	9,17	7,01	7,50	5,15
8	33,22	10,80	8,21	7,81	6,40
9	30,01	10,20	7,70	6,60	5,51
10	26,07	9,54	7,09	7,03	5,68
11	29,33	10,02	6,35	5,10	4,59
12	24,37	10,25	5,76	4,10	4,27
13	25,10	10,27	5,89	4,37	4,56
14	24,59	10,26	5,68	4,15	4,49

T	BVCL_BTEoX			BVCL_B	BVCL_T	BVCL_E	BVCL_oX
	Cgas	O2	CO2	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas
(dias)	(mg L-1)	(%)	(%)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)
0	80,71	21,0	0,34	24,30	21,20	20,73	14,48
1	51,47	19,90	0,42	16,94	13,84	13,11	7,58
2	34,93	15,7	4,59	12,00	6,49	11,84	4,60
3	8,19	9,3	9,17	0,06	0,09	7,52	0,53
4	5,24	9,5	9,98	0,04	0,08	4,92	0,20
5	4,84	10,7	7,40	0,05	0,08	4,67	0,04
6	3,50	11,1	6,36	0,06	0,20	2,77	0,46
7	2,17	11,5	5,71	0,08	0,33	0,87	0,88
8	2,05	12,5	5,40	0,02	0,03	1,92	0,07
9	0,40	13,4	4,60	0,03	0,06	0,05	0,26
10	0,95	14,4	3,97	0,02	0,03	0,67	0,23
11	0,44	15,2	3,38	0,01	0,04	0,26	0,14
12	0,71	15,8	3,21	0,01	0,07	0,43	0,20
13	0,12	16,4	2,9	0,01	0,03	0,02	0,06
14	0,18	17,4	2,29	0,01	0,03	0,07	0,07
15	0,21	17,4	2,29	0,01	0,03	0,08	0,09

T	BVbCL BTEoX			BVbCL B	BVbCL T	BVbCL E	BVbCL oX
	Cgas	O2	CO2	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas
(dias)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)
0	73,20	21,4	0,34	15,19	14,96	15,04	28,01
1	56,17	21,10	0,35	12,88	13,33	14,27	15,69
2	35,20	20,9	0,36	11,04	10,82	7,57	5,77
3	33,87	20,8	0,37	11,30	11,10	13,90	7,56
4	32,36	20,6	0,36	9,44	9,90	7,64	5,37
5	20,57	20,3	0,36	6,49	6,70	4,06	3,32
6	21,88	20,2	0,38	5,86	5,86	5,35	4,81
7	23,19	20,1	0,39	0,73	8,46	8,50	5,50
8	18,72	19,8	0,48	5,62	6,27	3,41	3,41
9	20,07	19,2	0,76	4,86	5,66	5,15	4,40
10	9,21	17,6	1,87	3,01	2,65	1,05	2,50
11	8,32	15,9	3,17	0,01	0,50	4,75	3,06
12	5,37	15,4	3,01	0,07	0,14	2,86	2,30
13	4,31	15,4	2,73	0,04	0,17	1,54	2,56
14	6,33	15,6	2,19	0,06	0,13	3,70	2,44
15	4,72	16,0	2,20	0,04	0,08	2,64	1,95

T	BSR_B	BbSR_B	BSR_T	BbSR_T	BSR_E	BbSR_E	BSR_X	BbSR_X
(dias)	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas
(dias)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)
0	93,64	99,52	63,69	74,04	29,80	33,83	24,94	29,90
1	86,39	87,98	66,41	60,19	25,94	34,02	24,55	28,48
2	77,04	84,43	49,51	49,67	23,21	33,22	18,99	27,00
3	78,13	79,88	55,12	53,59	18,03	31,90	17,55	25,51
4	78,26	61,64	53,13	50,84	16,86	28,49	17,43	29,76
5	66,66	68,06	43,36	54,09	15,05	28,59	12,19	27,15
6	58,25	67,20	47,41	52,69	13,05	25,06	11,87	26,30
7	59,94	61,40	43,54	52,04	12,75	24,12	11,94	24,04
8	48,89	61,13	40,61	47,10	13,71	22,98	10,48	20,98
9	56,68	55,66	37,53	41,92	12,61	28,85	8,55	21,64
10	57,16	58,19	37,34	40,96	10,56	24,22	8,23	22,20
11	54,00	49,90	35,69	39,88	9,64	21,16	8,08	22,50
12	53,82	46,98	34,20	41,05	10,33	23,20	7,39	22,05
13	53,63	44,97	32,71	44,25	11,03	22,29	6,71	21,58
14	52,44	48,37	29,47	39,71	9,96	22,22	5,98	21,82
15	49,76	36,73	29,43	40,94	8,26	23,06	5,90	20,94
16	43,55	36,87	25,40	40,34	7,42	21,90	4,57	23,45
17	42,50	37,44	19,96	40,09	6,58	20,69	4,06	20,11
18	44,71	36,35	22,80	39,46	5,44	20,08	2,92	21,39
19	44,36	36,21	18,29	36,78	4,43	18,57	2,20	18,75
20	40,82	35,57	15,34	35,92	2,86	19,33	1,88	17,32
21	37,27	29,21	12,40	34,44	1,28	21,55	1,57	20,02
22	36,15	32,49	7,46	34,71	0,70	19,28	1,53	21,81
23	35,11	27,51	2,92	35,24	0,67	18,25	1,53	16,71
24	27,64	26,64	0,26	35,19	0,57	19,80	1,56	19,02
25	28,36	26,08	0,15	35,48	0,38	21,44	1,44	18,73
26	29,09	29,47	0,13	34,32	0,22	21,82	1,31	17,10
27	27,04	29,20			0,16	22,81	1,29	16,85
28	31,16	26,37					1,39	15,43
29	27,84	23,99					1,31	17,38
30	24,53	22,92					1,22	18,24
31	23,38	22,41					1,15	16,21
32	22,22	21,60					1,07	16,29
33	21,86	24,97					0,99	15,60
34	21,51	22,58					0,91	15,54
35	19,13	19,27					0,95	15,52
36	16,76	18,95					1,00	14,46
37	17,75	17,13					1,07	14,10
38	18,73						1,14	14,84
39	17,03	18,07					1,09	14,94
40	15,32	17,21					1,04	15,55
41	15,07	16,38					0,98	17,28
42	14,82	16,51					0,92	15,19

T	BSR2_B	BSR2_T	BSR2_E	BSR2_X
(dias)	Cgas (mg L-1)	Cgas (mg L-1)	Cgas (mg L-1)	Cgas (mg L-1)
0	73,19	68,65	39,86	26,49
1	74,92	49,58	31,10	31,47
2	77,01	39,23	26,52	16,64
3	74,23	36,64	23,13	16,83
4	71,44	34,04	18,79	15,16
5	74,06	31,55	20,70	17,40
6	62,01	34,07	18,08	15,50
7	58,57	31,65	15,45	12,87
8	64,76	28,24	16,61	10,47
9	58,45	31,16	14,87	9,00
10	52,91	28,92	13,12	7,87
11	47,37	26,67	11,28	6,96
12	44,38	24,64	9,05	6,35
13	49,56	24,62	8,94	5,71
14	45,70	24,01	7,27	4,80
15	41,85	23,41	6,83	3,80
16	40,03	20,64	5,67	2,99
17	37,08	19,34	3,47	2,94
18	34,14	18,04	2,57	2,89
19	28,93	17,42	1,84	2,85
20	25,52	15,04	1,01	2,74
21	22,11	12,67	0,32	2,62
22	21,72	12,85	0,37	2,59
23	18,12	6,08		2,37
24	15,11	3,64		2,24
25	12,10	1,20		2,11
26	8,39	0,54		1,96
27	6,73	0,46		1,97
28	4,28	0,30		1,97
29	2,21			1,96
30	1,03			1,86
31	0,39			1,76
32	0,08			1,68
33				1,64
34				1,64
35				1,21
36				1,23
37				1,04
38				0,73
39				1,01
40				0,88
41				0,90
42				0,83

T	BVS _R B			BVbS _R B			BVS _{R2} B		
	C _{gas}	O ₂	CO ₂	C _{gas}	O ₂	CO ₂	C _{gas}	O ₂	CO ₂
(dias)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)
0	106,36	21,50	0,44	88,79	21,20	0,44	66,33	21,00	0,32
1	88,88	20,70	0,93	82,68	20,70	0,70	85,63	20,60	0,86
2	68,63	20,50	1,16	70,65	20,70	0,70	67,34	20,60	0,82
3	58,32	20,50	1,28	53,41	20,80	0,71	63,09	20,50	0,89
4	53,62	20,50	1,28	50,94	20,80	0,68	58,85	20,40	0,96
5	39,79	20,60	1,26	42,50	20,70	0,69	54,06	20,30	1,04
6	26,72	20,70	1,24	41,07	20,70	0,69	49,58	20,10	1,14
7	26,50	20,60	1,26	34,95	20,80	0,69	36,33	20,00	1,19
8	22,39	20,50	1,29	27,09	20,80	0,70	30,41	19,80	1,30
9	18,93	20,30	1,30	24,03	20,60	0,71	28,72	19,70	1,45
10	15,36	20,10	1,37	21,77	20,20	0,74	25,24	19,35	1,77
11	14,28	20,10	1,40	22,66	20,20	0,76	21,76	19,00	2,09
12	12,70	20,00	1,46	20,83	20,30	0,80	15,07	18,80	2,29
13	10,25	19,90	1,84	18,86	20,20	0,82	12,22	18,40	2,53
14	5,74	19,10	2,49	16,85	20,40	0,88	11,80	18,10	2,84
15	1,74	18,30	3,27	19,99	20,40	0,88	11,38	17,80	3,15
16	0,47	18,40	3,15	17,92	20,40	0,96	8,73	17,60	3,45
17	0,25	18,60	2,94	16,04	20,40	0,99	7,65	17,50	3,51
18	0,22	18,60	2,73	15,99	20,40	0,98	6,30	17,10	3,74
19							1,23	17,20	3,87
20							0,09	17,40	3,62
21							0,09	17,80	3,36
22							0,09	17,90	3,22

T	BVSr T			BVbSr T			BVSr2 T		
	Cgas	O2	CO2	Cgas	O2	CO2	Cgas	O2	CO2
(dias)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)
0	59,84	21,50	0,44	68,81	21,20	0,44	64,69	21,00	0,32
1	50,92	21,00	0,74	56,54	20,90	0,57	45,75	20,60	0,81
2	40,80	20,90	0,83	52,61	20,90	0,58	32,22	20,70	0,74
3	32,63	20,80	1,01	48,91	21,00	0,60	30,70	20,70	0,75
4	26,67	20,60	1,27	34,71	20,90	0,59	29,17	20,70	0,75
5	22,95	20,50	1,34	32,94	20,90	0,60	24,83	20,50	0,84
6	15,44	20,40	1,50	33,03	20,80	0,61	20,25	20,30	1,05
7	14,10	19,70	2,15	25,51	20,90	0,63	16,92	19,90	1,28
8	8,95	18,80	2,91	21,60	20,80	0,64	14,46	19,40	1,66
9	3,72	16,60	4,69	20,52	20,70	0,65	11,26	19,00	2,09
10	0,94	16,20	4,92	19,53	20,30	0,68	9,77	18,20	2,83
11	1,17	16,40	4,87	18,37	20,20	0,71	8,28	17,40	3,57
12	0,72	16,50	4,88	19,35	20,30	0,74	4,59	16,70	4,12
13	0,35	16,60	4,84	14,76	20,30	0,73	1,74	15,50	4,97
14	0,32	16,90	4,57	16,06	20,50	0,79	1,29	15,30	5,21
15	0,17	17,30	4,24	15,88	20,60	0,79	0,83	15,10	5,44
16							1,13	15,50	5,23
17							1,07	16,00	4,92
18							0,97	16,40	4,51
19							0,17	16,80	4,36
20							0,18	17,00	4,05
21							0,12	17,50	3,73
22							0,10	17,60	3,58

T	BVSr_E			BVbSr_E			BVSr2_E		
	Cgas	O2	CO2	Cgas	O2	CO2	Cgas	O2	CO2
(dias)	(mg L-1)	(%)	(%)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)	(mg L-1)	(%)	(%)
0	31,23	21,50	0,44	31,76	21,20	0,44	36,03	21,00	0,34
1	21,27	21,10	0,74	32,82	20,90	0,55	23,29	20,70	1,01
2	18,01	21,10	0,71	30,36	20,90	0,56	14,55	20,60	0,92
3	14,97	21,10	0,72	25,79	21,10	0,57	12,92	20,60	0,89
4	13,23	20,90	0,75	21,53	21,00	0,56	11,48	20,70	0,86
5	10,70	20,90	0,89	19,89	20,90	0,58	10,51	20,40	0,95
6	9,77	20,70	1,17	18,93	20,90	0,62	9,45	19,85	1,06
7	9,44	20,00	1,83	20,21	20,80	0,75	8,40	19,30	1,17
8	6,65	18,90	2,71	11,87	20,70	0,86	10,23	18,80	1,35
9	4,26	16,70	4,42	12,91	20,40	0,94	8,75	19,40	1,58
10	1,69	15,80	5,09	13,67	20,00	1,13	7,46	19,40	1,47
11	1,71	16,10	5,02	12,01	19,80	1,23	6,41	19,20	1,68
12	0,80	16,10	5,23	12,27	20,00	1,24	5,66	19,30	1,85
13	0,40	16,00	5,41	9,79	19,90	1,29	6,77	18,90	2,19
14	0,21	16,00	5,35	11,31	20,10	1,36	3,42	18,80	2,27
15	0,32	16,00	4,97	11,33	20,20	1,34	3,33	18,50	2,56
16							2,81	18,50	2,73
17							1,63	18,10	3,06
18							1,38	17,60	3,52
19							1,07	17,50	3,59
20							0,80	17,20	4,03
21							0,33	16,90	4,31
22							0,43	17,10	4,15
23							0,19	17,30	3,93
24									
25									
26									
27									
28									

T	BVSX			BVbSX			BVS2 X		
	Cgas	O2	CO2	Cgas	O2	CO2	Cgas	O2	CO2
(dias)	(mg L-1)	(%)	(%)	(mg L-1)	(%)	(%)	(mg L-1)	(%)	(%)
0	26,60	21,50	0,44	25,63	21,40	0,44	58,25	20,90	0,41
1	20,80	21,10	0,73	24,54	21,10	0,72	31,51	20,60	1,15
2	14,64	21,10	0,69	24,08	21,10	0,68	28,33	20,50	1,16
3	13,99	21,10	0,69	21,91	21,20	0,68	21,09	20,30	1,25
4	11,18	21,00	0,68	23,19	20,80	0,66	18,38	20,00	1,47
5	9,66	21,10	0,66	19,77	21,00	0,63	13,72	19,30	1,86
6	8,38	21,20	0,72	17,96	20,90	0,70	13,38	18,60	2,19
7	7,89	21,10	0,76	12,89	21,10	0,71	9,97	18,40	2,36
8	7,35	21,00	0,81	14,47	21,10	0,71	6,68	18,20	2,55
9	7,17	20,70	0,92	13,96	21,00	0,70	3,99	17,40	3,03
10	6,63	20,40	1,12	9,01	20,90	0,70	2,92	17,20	3,22
11	5,28	20,20	1,28	12,04	20,80	0,70	2,27	17,40	3,18
12	4,58	20,00	1,53	12,62	20,60	0,71	2,14	17,50	3,00
13	3,80	19,80	1,90	11,17	20,60	0,72	1,94	17,70	2,83
14	3,50	19,40	2,16	8,94	20,70	0,71	1,82	18,00	2,63
15	3,04	19,20	2,32	8,97	20,60	0,72	1,92	18,10	2,53
16	1,92	19,10	2,33	9,00	20,50	0,73	1,41	18,30	2,42
17	2,12	18,90	2,44	9,99	20,90	0,73	1,35	18,55	2,26
18	1,60	18,60	2,55	9,63	20,90	0,73	1,29	18,80	2,10
19	1,26	18,60	2,66	9,27	21,00	0,72	1,49	19,10	1,95
20	1,15	18,70	2,73	8,59	20,90	0,70	1,22	19,25	1,80
21	0,96	18,80	2,82	9,38	20,80	0,68	0,95	19,40	1,64
22	0,87	19,00	2,59	9,01	20,80	0,69	0,98	19,70	1,51
23	0,81	19,10	2,50	9,41	20,80	0,69	0,68	19,90	1,40
24	0,57	19,40	2,29	8,03	20,80	0,69	0,68	19,90	1,33
25	0,49	19,50	2,13	7,63	20,80	0,69	0,63	19,90	1,23
26	0,45	19,60	2,10	8,19	20,60	0,71	0,68	19,90	1,12
27	0,50	19,70	1,95	7,51	20,50	0,73	0,50	20,10	0,99
28							0,40	20,40	0,90

T	BSR_BTEo X	BSR_B	BSR_T	BSR_E	BSR_o X	BbSR_BTEo X	BbSR_B	BbSR_T	BbSR_E	BbSR_o X
	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas
(dias)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)
0	65,09	19,90	18,63	15,12	11,45	67,29	21,21	22,30	13,15	10,64
1	50,56	17,83	11,91	14,81	6,02	56,89	14,13	14,78	16,66	11,32
2	43,56	16,14	11,87	8,98	6,56	60,94	14,67	15,80	18,51	11,96
3	38,68	15,94	10,80	7,07	4,87	47,76	11,63	12,10	15,01	9,03
4	58,92	18,02	15,41	13,69	11,80	48,21	12,01	11,90	14,77	9,53
5	56,44	19,94	15,19	12,07	9,25	48,91	11,53	12,29	16,14	8,95
6	53,96	21,86	14,97	10,44	6,69	55,32	13,88	11,90	19,00	10,54
7	43,59	18,02	12,08	7,88	5,62	59,37	14,31	14,19	20,10	10,77
8	33,22	14,17	9,19	5,31	4,55	49,56	12,16	11,88	16,74	8,79
9	30,69	12,92	8,31	4,99	4,46	48,40	12,65	11,86	15,77	8,13
10	30,28	13,45	8,27	4,49	4,07	40,54	9,52	8,99	14,70	7,32
11	29,80	13,36	8,18	4,32	3,95	46,83	10,97	10,90	16,64	8,31
12	30,15	13,83	8,43	3,92	3,97	42,16	10,35	9,77	14,88	7,16
13	32,25	14,65	8,66	4,93	4,01	41,49	9,88	9,31	15,14	7,16
14	25,11	12,11	7,17	2,65	3,19	37,31	9,55	8,34	13,28	6,14
15	24,01	11,67	6,86	2,34	3,14	33,34	9,19	7,27	11,76	5,12
16	22,91	11,24	6,55	2,03	3,09	39,96	10,32	9,17	15,08	5,39
17	24,44	12,20	6,99	1,81	3,44	38,51	9,55	8,68	14,67	5,61
18	20,58	10,73	5,73	1,11	3,01	37,44	9,43	8,38	13,93	5,70
19	16,73	9,25	4,48	0,42	2,58	33,30	8,67	7,39	12,39	4,85
20	15,21	8,29	3,88	0,25	2,79	31,75	8,60	7,35	11,28	4,52
21	14,62	8,01	3,63	0,23	2,76	36,22	9,40	7,73	13,77	5,32
22	14,03	7,73	3,38	0,20	2,72	33,17	8,68	7,00	12,58	4,91
23	11,10	6,09	2,41	0,13	2,47	30,14	8,45	6,25	11,24	4,20
24	8,18	4,46	1,44	0,05	2,23	32,66	7,49	7,22	12,67	5,28
25	5,99	2,63	0,93	0,05	2,37	32,33	6,91	7,31	13,01	5,09
26	3,79	0,81	0,42	0,04	2,51	31,81	6,27	6,22	14,01	5,31
27	2,47	0,42	0,23	0,04	1,78	33,02	7,73	6,68	13,35	5,26
28	1,14	0,03	0,03	0,03	1,05	36,12	11,54	7,11	13,07	4,40
29	0,67	0,02	0,02	0,02	0,60	38,70	12,22	8,14	12,68	5,66
30	0,20	0,01	0,01	0,02	0,16	38,89	12,32	7,60	12,94	6,04

T	BVSR BTEoX			BVSR B	BVSR T	BVSR E	BVSR oX
	Cgas	O2	CO2	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas
(dias)	(mg L-1)	(%)	(%)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)
0	71,30	21,00	0,34	20,92	22,07	15,38	12,94
1	48,89	20,50	0,91	16,40	12,76	12,55	7,17
2	39,64	20,40	0,97	14,92	10,71	8,38	5,63
3	32,52	20,20	1,36	12,27	8,33	7,82	4,11
4	39,31	20,10	1,34	12,34	9,96	8,54	8,48
5	33,32	19,70	1,67	11,15	8,13	8,06	5,98
6	27,32	19,30	2,00	9,97	6,30	7,57	3,48
7	15,82	18,60	2,60	7,29	4,07	1,72	2,75
8	12,02	17,60	3,36	6,09	2,60	0,52	2,81
9	10,15	16,70	4,16	3,39	0,81	3,63	2,32
10	2,62	15,70	5,00	0,34	0,11	0,63	1,54
11	1,16	15,50	5,19	0,04	0,04	0,53	0,55
12	0,26	15,80	5,23	0,02	0,03	0,02	0,19
13	0,22	16,20	4,73	0,02	0,03	0,02	0,15
14	0,18	16,20	4,73	0,02	0,03	0,02	0,11

T	BVbSR BTEoX			BVSR B	BVSR T	BVSR E	BVSR oX
	Cgas	O2	CO2	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas
(dias)	(mg L-1)	(%)	(%)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)
0	55,10	21,40	0,34	23,49	9,59	13,74	8,27
1	49,09	21,10	0,77	12,98	13,12	13,89	9,10
2	53,60	21,10	0,77	11,96	12,79	18,09	10,76
3	42,83	21,10	0,77	10,15	10,35	14,32	8,02
4	35,08	20,95	0,76	8,23	8,56	10,14	8,15
5	27,33	20,80	0,74	6,52	6,36	9,20	5,25
6	25,69	20,90	0,71	5,46	5,67	9,57	4,99
7	25,65	21,00	0,72	5,74	5,98	9,20	4,73
8	22,05	21,00	0,73	4,52	4,72	8,38	4,43
9	18,55	21,00	0,80	4,10	4,24	6,70	3,52
10	17,67	20,90	0,90	3,43	3,78	6,82	3,64
11	15,93	20,60	1,04	3,00	3,16	6,44	3,34
12	13,40	20,30	1,22	1,96	3,18	4,44	3,82
13	12,60	20,30	1,25	1,93	2,17	5,67	2,84
14	13,53	20,40	1,28	2,41	2,19	6,50	2,42

T	BXT_B	BbXT_B	BXT_T	BbXT_T	BXT_E	BbXT_E	BXT_X	BbXT_X
	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas
(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)
0	116,16	119,84	74,81	77,23	36,97	45,00	39,12	45,53
1	103,61	103,89	70,16	69,49	27,09	25,96	27,80	34,92
2	96,89	91,68	64,39	62,15	21,86	19,83	21,17	24,33
3	43,41	80,53	59,51	63,15	14,62	18,54	18,02	21,70
4	2,34	78,86	51,36	50,74	8,48	16,11	16,06	18,15
5	1,45	72,20	47,96	46,05	3,78	16,93	15,23	21,23
6	0,70	72,17	4,17	47,08	2,21	17,07	9,24	17,08
7	0,28	75,80	1,36	44,78	1,56	17,30	7,10	18,31
8	0,29	75,95	0,70	41,42	1,05	14,70	3,12	16,49
9	0,18	70,41	0,25	45,67	0,78	17,34	2,60	15,12
10		62,77	0,24	40,24	0,41	12,95	1,87	11,97
11		62,27	0,21	40,48	0,39	13,00	2,11	12,59
12		59,22		40,74	0,33	13,26	1,46	13,94
13		60,76		40,89		13,67	0,62	11,51
14							0,60	13,07
15							0,45	12,17
16							0,44	12,60
17							0,39	12,57

T	BVXT_B			BVbXT_B		
	Cgas	O2	CO2	Cgas	O2	CO2
(dias)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)
0	118,51	21,0	0,32	119,83	21,4	0,32
1	95,62	20,3	1,48	98,20	21,0	0,58
2	54,78	19,0	2,62	61,55	21,0	0,60
3	5,34	10,7	9,87	56,52	20,9	0,62
4	0,45	11,1	9,77	42,81	20,9	0,63
5	0,35	12,0	9,13	38,01	20,9	0,70
6	0,24	12,6	8,50	35,35	20,8	0,80
7	0,24	13,1	7,70	33,10	20,50	0,89
8				27,91	20,40	1,05
9				24,66	20,10	1,16
10				23,25	19,90	1,23
11				25,10	19,70	1,74

T	BVXT T			BVbXT T		
	Cgas	O2	CO2	Cgas	O2	CO2
(dias)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)
0	71,00	21,0	0,32	76,91	21,4	0,32
1	45,81	20,6	1,63	55,78	21,1	0,58
2	48,99	19,5	2,35	50,29	21,0	0,60
3	25,96	18,1	3,69	38,78	21,0	0,61
4	2,20	12,1	8,61	31,21	21,0	0,64
5	0,36	11,9	8,88	32,90	21,1	0,68
6	0,34	12,1	8,62	24,28	21,1	0,74
7	0,33	12,9	8,24	22,54	20,7	0,83
8				17,74	20,3	1,22
9				14,36	19,4	1,96
10				17,69	18,8	3,26
11				15,05	18,1	4,40

T	BVXT E			BVbXT E		
	Cgas	O2 XTE	CO2 XTE	Cgas	O2	CO2
(dias)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)
0	42,47	21,0	0,32	48,40	21,4	0,32
1	19,62	20,6	1,56	18,39	21,1	0,57
2	19,76	19,3	2,59	15,23	21,0	0,59
3	6,06	14,2	6,88	10,37	21,0	0,60
4	0,85	13,0	7,88	10,94	21,0	0,59
5	0,41	13,1	7,92	9,60	21,1	0,60
6	0,38	13,3	7,62	8,65	21,1	0,61
7	0,27	13,7	7,58	8,00	20,9	0,64
8				6,86	20,80	0,72
9				7,11	20,50	0,84
10				7,11	19,80	1,02
11				8,32	20,10	1,39
12						
13						
14						

T	BVXT_X			BVbXT_X		
	Cgas	O2	CO2	Cgas	O2	CO2
(dias)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)
0	41,00	21,0	0,32	41,60	21,4	0,32
1	15,87	20,6	1,63	19,28	21,1	0,61
2	13,80	19,6	2,37	16,58	21,0	0,61
3	11,16	18,6	2,50	14,15	21,0	0,60
4	7,00	17,6	4,04	11,18	21,0	0,58
5	3,93	15,8	5,44	10,48	21,1	0,59
6	2,35	14,7	6,19	8,02	21,1	0,60
7	1,25	14,2	6,59	8,89	20,9	0,60
8	0,88	14,1	6,63	6,16	20,9	0,61
9	0,56	14,2	6,54	6,43	20,8	0,61
10	0,61	14,6	6,46	7,76	20,6	0,62
11	0,53	14,8	6,27	8,35	20,6	0,62
12	0,46	15,2	6,04	8,93	20,6	0,62
13	0,44	15,6	5,83	7,43	20,3	1,12
14	0,33	15,9	5,73	7,38	20,5	1,12

T	BXT_BTEo_X	BXT_B	BXT_T	BXT_E	BXT_o_X	BbXT_BTEo_X	BbXT_B	BbXT_T	BbXT_E	BbXT_oX
	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas
(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)
0	74,53	29,30	18,94	12,42	13,86	70,19	20,18	16,61	19,23	14,17
1	55,05	20,86	16,07	9,92	8,20	65,84	19,54	15,06	16,77	14,47
2	52,38	20,04	15,28	9,42	7,64	67,24	21,63	15,97	16,48	13,16
3	48,83	19,85	14,08	8,45	6,46	46,05	15,92	10,94	10,26	8,93
4	54,68	18,05	14,76	11,03	10,84	44,30	16,54	10,58	9,44	7,75
5	52,00	18,79	14,30	9,65	9,25	43,70	16,50	10,33	9,01	7,86
6	49,31	19,54	13,83	8,28	7,67	42,53	16,50	10,17	8,56	7,30
7	34,95	15,74	8,93	4,44	5,83	47,46	17,89	12,12	9,00	8,45
8	20,58	11,95	4,03	0,60	4,00	52,83	20,67	13,57	10,43	8,15
9	4,79	0,35	0,28	0,54	3,62	38,36	15,20	9,55	7,41	6,20
10	2,83	0,04	0,10	0,38	2,30	40,19	15,78	9,75	8,04	6,62
11	1,92	0,02	0,04	0,22	1,65	32,88	13,25	8,34	6,18	5,11
12	0,96	0,02	0,04	0,04	0,86	33,63	13,94	8,30	6,11	5,28
13	1,38	0,03	0,06	0,77	0,52	34,61	14,29	8,47	6,42	5,43
14	0,30	0,02	0,03	0,03	0,23	37,66	15,55	8,75	7,38	5,99
15	0,44	0,01	0,02	0,24	0,17	36,45	15,06	8,23	8,17	4,99
16	0,59	0,01	0,02	0,45	0,11	35,75	14,64	7,22	9,50	4,37
17	0,78	0,02	0,03	0,62	0,10	28,70	12,48	6,79	5,18	4,25
18	0,47	0,02	0,03	0,35	0,06	27,87	11,59	6,88	5,99	3,41
19	0,16	0,01	0,03	0,09	0,03	27,03	10,97	6,62	4,61	4,84
20	0,13	0,01	0,02	0,07	0,03	26,56	11,58	6,46	4,65	3,87
21	0,10	0,01	0,01	0,05	0,03	27,32	11,40	7,01	4,71	4,20

T	BVXT BTEoX			BVXT B	BVXT T	BVXT E	BVXT oX
	Cgas	O2	CO2	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas
(dias)	(mg L-1)	(%)	(%)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)
0	73,48	21,0	0,34	23,99	19,47	18,79	11,22
1	40,75	20,2	1,90	16,97	11,47	6,76	5,55
2	37,20	19,4	2,54	16,29	10,78	4,89	5,23
3	16,89	12,4	8,20	0,51	9,45	1,88	1,06
4	5,12	11,8	8,97	0,15	2,43	1,86	0,67
5	4,60	11,8	9,03	0,18	1,47	2,23	0,71
6	4,08	11,7	9,08	0,21	0,52	2,60	0,75
7	1,54	12,4	8,48	0,02	0,03	1,40	0,10
8	1,18	13,1	7,83	0,18	0,24	0,13	0,62
9	2,25	13,9	7,22	0,09	0,08	1,61	0,48
10	1,16	14,5	6,68	0,01	0,02	1,06	0,08
11	1,40	15,0	6,21	0,01	0,02	1,28	0,08
12	0,11	15,6	5,71	0,02	0,02	0,03	0,04
13	0,13	16,7	4,71	0,02	0,02	0,04	0,05
14	0,13	16,7	4,71	0,01	0,02	0,04	0,06

T	BVbXT BTEoX			BVbXT B	BVbXT T	BVbXT E	BVbXT oX
	Cgas	O2	CO2	Cgas	Cgas	Cgas	Cgas
(dias)	(mg L ⁻¹)	(%)	(%)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)	(mg L-1)
0	72,77	21,4	0,34	17,59	17,15	23,73	14,30
1	64,87	21,1	0,67	16,81	17,43	16,72	13,91
2	55,87	21,0	0,68	13,95	13,83	15,84	12,25
3	40,31	21,1	0,68	10,92	10,60	10,29	8,50
4	41,29	20,9	0,68	10,60	10,84	10,61	9,24
5	38,06	20,9	0,68	9,39	9,50	9,63	9,54
6	34,83	20,9	0,68	8,63	8,63	9,62	7,96
7	30,00	20,9	0,73	7,68	7,79	7,71	6,81
8	29,89	20,9	0,83	7,56	7,49	8,11	6,73
9	24,55	20,7	1,04	6,65	6,45	5,51	5,93
10	17,92	20,2	1,45	0,01	5,09	6,33	6,49
11	12,88	19,1	2,41	3,92	2,47	1,71	4,78
12	6,03	17,7	3,59	0,48	0,16	1,62	3,77
13	6,00	17,6	3,62	0,08	0,09	2,22	3,61
14	5,84	17,9	3,49	0,08	0,09	2,11	3,56

Biomassa no Final dos Ensaios de Bio-remediação e Bio-ventilação					
Ensaio	CFU mL ⁻¹	Ensaio	CFU mL ⁻¹	Ensaio	CFU mL ⁻¹
BVCL_B	7,70E+06	BVSR_B	1,17E+06	BVXT_B	8,34E+06
BVCL_T	1,29E+06	BVSR_T	3,25E+06	BVXT_T	5,73E+06
BVCL_E	6,52E+06	BVSR_E	3,04E+06	BVXT_E	4,19E+06
BVCL_X	3,90E+06	BVSR_X	1,61E+05	BVXT_X	2,80E+06
BVCL_BTEoX	4,50E+06	BVSR_BTEoX	2,78E+06	BVXT_BTEoX	7,41E+06
BCL_B	4,64E+06	BSR_B	2,44E+05	BXT_B	9,13E+05
BCL_T	1,22E+06	BSR_T	7,65E+05	BXT_T	3,05E+06
BCL_E	5,05E+06	BSR_E	1,33E+05	BXT_E	6,92E+05
BCL_X	6,40E+05	BSR_X	4,40E+04	BXT_X	2,02E+06
BCL_BTEoX	1,90E+06	BSR_BTEoX	2,67E+05	BXT_BTEoX	3,72E+06
BVbCL_B	2,70E+06	BVbSR_B	2,62E+03	BVbXT_B	3,30E+03
BVbCL_T	3,02E+05	BVbSR_T	7,46E+04	BVbXT_T	4,05E+03
BVbCL_E	1,18E+05	BVbSR_E	9,90E+02	BVbXT_E	3,20E+03
BVbCL_X	5,85E+03	BVbSR_X	4,75E+02	BVbXT_X	3,90E+02
BVbCL_BTEoX	2,48E+04	BVbSR_BTEoX	1,62E+04	BVbXT_BTEoX	3,50E+03
BbCL_B	4,95E+03	BbSR_B	2,69E+03	BbXT_B	0,00E+00
BbCL_T	3,70E+03	BbSR_T	0,00E+00	BbXT_T	0,00E+00
BbCL_E	3,55E+03	BbSR_E	3,70E+03	BbXT_E	0,00E+00
BbCL_X	3,40E+03	BbSR_X	0,00E+00	BbXT_X	0,00E+00
BbCL_BTEoX	2,06E+04	BbSR_BTEoX	8,50E+03	BbXT_BTEoX	1,89E+03
		BVSR2_B	2,81E+06		
		BVSR2_T	2,04E+06		
		BVSR2_E	4,70E+05		
		BVSR2_X	1,04E+06		
		BSR2_B	2,94E+05		
		BSR2_T	1,03E+06		
		BSR2_E	2,30E+05		
		BSR2_X	4,00E+05		

Ensaio	t _{rem} (dias)	Ef _{Final} (%)	Ef ₇ (%)	Ensaio	t _{rem} (dias)	Ef _{Final} (%)	Ef ₇ (%)	Ensaio	t _{rem} (dias)	Ef _{Final} (%)	Ef ₇ (%)
BVCL_B	11	99,62	84,00	BVSR_B	18	99,72	63,68	BVXT_B	6	99,66	99,66
BVCL_T	10	99,47	97,00	BVSR_T	15	99,80	83,46	BVXT_T	7	99,67	99,67
BVCL_E	10	99,41	96,08	BVSR_E	15	99,48	84,75	BVXT_E	7	99,66	99,66
BVCL_X	11	98,64	96,09	BVSR_X	27	99,21	79,87	BVXT_X	14	99,63	98,38
BVCL_BTEoX	15	99,47	93,44	BVSR_BTEoX	14	99,74	65,64	BVXT_BTEoX	14	99,82	97,16
BCL_B	13	99,31	41,48	BSR_B	42	79,94	16,04	BXT_B	9	99,73	99,60
BCL_T	10	99,62	97,33	BSR_T	26	99,85	48,97	BXT_T	11	99,79	99,75
BCL_E	10	99,49	96,08	BSR_E	27	99,74	79,40	BXT_E	12	99,58	98,98
BCL_X	17	98,24	90,88	BSR_X	42	98,42	66,39	BXT_X	17	99,56	96,16
BCL_BTEoX	14	99,84	98,03	BSR_BTEoX	30	99,71	1,00	BXT_BTEoX	21	99,86	1,00
BVbCL_B	11	71,94	52,23	BVbSR_B	18	78,34	51,77	BVbXT_B	12	72,07	63,41
BVbCL_T	10	62,98	50,01	BVbSR_T	15	81,38	70,11	BVbXT_T	12	84,18	76,18
BVbCL_E	10	62,69	44,49	BVbSR_E	15	81,71	67,42	BVbXT_E	10	88,50	88,96
BVbCL_X	11	34,14	10,42	BVbSR_X	27	81,06	63,05	BVbXT_X	14	85,74	81,76
BVbCL_BTEoX	15	84,78	14,36	BVbSR_BTEoX	14	71,21	40,46	BVbXT_BTEoX	14	86,77	7,81
BbCL_B	13	20,11	19,42	BbSR_B	42	77,59	13,94	BbXT_B	9	23,19	23,19
BbCL_T	10	42,56	13,85	BbSR_T	26	59,75	39,02	BbXT_T	11	56,28	56,28
BbCL_E	10	24,43	23,71	BbSR_E	27	63,20	61,09	BbXT_E	12	80,82	80,82
BbCL_X	17	11,30	5,03	BbSR_X	42	54,60	18,98	BbXT_X	17	70,87	70,87
BbCL_BTEoX	14	8,65	1,72	BbSR_BTEoX	30	4,03	1,00	BbXT_BTEoX	21	17,53	1,00
				BVSR2_B	22	99,89	49,82				
				BVSR2_T	22	99,88	76,67				
				BVSR2_E	23	99,69	68,88				
				BVSR2_X	28	99,38	42,26				
				BSR2_B	32	99,90	18,01				
				BSR2_T	28	99,64	62,88				
				BSR2_E	22	99,40	75,05				
				BSR2_X	42	98,60	63,10				

Determinação da ordem e constante cinética dos ensaios de bio-remediação e bio-ventilação:

```
function data = orderseek(t,C)
%DATA = ORDERSEEK(T,C)
%Searches for the least-squares optimum solution for the reaction order
%from inputs time (t) and concentration (C). Outputs a struct (data) which
%contains the (1) reaction order (2) rate constant (3) rsquared value (4)
%half-life.
%t and C are vectors.
n = fminsearch(@os_obj(t,C,x),0);
best_fit = polyfit(t,1./(C.^(n-1)),1);
k = best_fit(1)/(n-1);
rsquared = os_obj(t,C,n);
halflife = (2^(n-1) - 1)/...
    ((n-1)*k*C(1)^(n-1));
data.order = n;
data.k = k;
data.rsquared = -rsquared; %Revert back to positive value.
data.halflife = halflife;

function rsquared = os_obj(t,C,n)
%Order seek objective function. Returns the correlation coefficient for the
%line fit of the transformed data.
C_xform = 1./(C.^(n-1));
rsquared = -corr(t,C_xform).^2; %Negative, because we want the minimizer to maximize it.
%(c) February 8, 2010, Bradley James Ridder, University of South Florida.
%References:
%http://en.wikipedia.org/wiki/Rate_equation#Summary_for_reaction_orders_0.2C_1.2C_2_and_n
```

ANEXO VII - ENSAIOS DE BIO-REMEDIAÇÃO E DE BIO-VENTILAÇÃO – MODELOS MATEMÁTICOS

**Ensaio de Bio-remediação não inoculado - Calcário com B, T, E e X
(BbCL_B, BbCL_T, BbCL_E, BbCL_X)**

Altura da coluna, cm	35,50			
Diâmetro da coluna, cm	5,00			
Volume da coluna, L	2,79			
Temperatura, °K	298,15			
Altura de solo na coluna, cm	12,00			
Volume de solo granel, VM, L	0,94			
Volume de ar acima do solo, VA, L	1,85			
Massa solo seco, g	1278,00			
Densidade das partículas do solo, kg/L	2,73			
Volume de solo seco, Vs, L	0,47			
Volume de água no solo, VL	0,14			
Volume de ar no solo, VV	0,33			
Humidade volumétrica	0,15			
Porosidade com ar	0,35			
Volume total	2,79			
Fracção carbono orgânico solo	0,0065			
Fracção de argila considerada	0,0010			
Densidade a granel solo, L/kg	1,51			
	Benzeno	Tolueno	Etilbenzeno	Xileno
Kco, L/kg	67,60	204,20	446,70	457,10
Constante Henry Pa m3/mol	576,39	683,32	861,84	670,00
Ks, L/kg	0,51	1,53	3,35	3,43
Vs, m3	4,68E-04			
Vw, m3	1,42E-04			
VA, m3	2,18E-03			
Vt, m3	2,79E-03			
ZA, mol/(m3 Pa)	4,03E-04	4,03E-04	4,03E-04	4,03E-04
Zw, mol/(m3,Pa)	1,73E-03	1,46E-03	1,16E-03	1,49E-03
ZS, mol/(m3 Pa)	2,40E-03	6,13E-03	1,06E-02	1,40E-02
VsZs, mol/Pa	1,13E-06	2,87E-06	4,97E-06	6,55E-06
VwZw, mol/Pa	2,46E-07	2,08E-07	1,65E-07	2,12E-07
VaZa, mol/Pa	8,79E-07	8,79E-07	8,79E-07	8,79E-07
SUM ViZi	2,25E-06	3,95E-06	6,02E-06	7,64E-06
Massa injectada, mg	284,00	284,00	284,00	284,00
M, g/mol	78,12	92,15	106,18	106,18
Massa injectada, mol	3,64E-03	3,08E-03	2,67E-03	2,67E-03
Fugacidade, Pa	1615,26	779,32	444,45	350,16
Concentração no ar, g/m3, mg/L	50,91	28,97	19,04	15,00
Concentração na água, g/m3, mg/L	218,92	105,10	54,76	55,49
Concentração no solo, g/m3, mg/L	303,42	440,00	501,48	520,05
Massa no ar, mg	110,87	63,10	41,47	32,67
Massa no agua, mg	31,09	14,92	7,78	7,88
Massa no solo, mg	142,04	205,98	234,76	243,45
	284,00	284,00	284,00	284,00
Concentração no ar Experimental mg/L	57,01	28,83	19,32	15,81

**Ensaio de Bio-remediação não inoculado - Granito com B, T, E e X
(BbSR_B, BbSR_T, BbSR_E, BbSR_X)**

Altura da coluna, cm	35,50			
Diâmetro da coluna, cm	5,00			
Volume da coluna, L	2,79			
Temperatura, °K	298,15			
Altura de solo na coluna, cm	15,50			
Volume de solo granel, VM, L	1,22			
Volume de ar acima do solo, VA, L	1,57			
Massa solo seco, g	1136,00			
Densidade das partículas do solo, kg/L	2,68			
Volume de solo seco, Vs, L	0,42			
Volume de água no solo, VL	0,28			
Volume de ar no solo, VV	0,51			
Humidade volumétrica	0,23			
Porosidade com ar	0,42			
Volume total	2,79			
Fracção carbono orgânico solo	0,0040			
Fracção de argila considerada	0,0025			
Densidade a granel solo, L/kg	0,61			
	Benzeno	Tolueno	Etilbenzeno	Xileno
Kco, L/kg	67,60	204,20	446,70	457,10
Constante Henry Pa m3/mol	576,39	683,32	861,84	670,00
Ks, L/kg	0,44	1,32	2,89	2,95
Vs, m3	4,24E-04			
Vw, m3	2,84E-04			
VA, m3	2,08E-03			
Vt, m3	2,79E-03			
ZA, mol/(m3 Pa)	4,03E-04	4,03E-04	4,03E-04	4,03E-04
Zw, mol/(m3,Pa)	1,73E-03	1,46E-03	1,16E-03	1,49E-03
ZS, mol/(m3 Pa)	2,03E-03	5,17E-03	8,97E-03	1,18E-02
VsZs, mol/Pa	8,61E-07	2,19E-06	3,80E-06	5,01E-06
VwZw, mol/Pa	4,93E-07	4,16E-07	3,30E-07	4,24E-07
VaZa, mol/Pa	8,39E-07	8,39E-07	8,39E-07	8,39E-07
SUM ViZi	2,19E-06	3,45E-06	4,97E-06	6,27E-06
Massa injectada, mg	284,00	284,00	284,00	284,00
M, g/mol	78,12	92,15	106,18	106,18
Massa injectada, mol	3,64E-03	3,08E-03	2,67E-03	2,67E-03
Fugacidade, Pa	1658,02	893,86	537,91	426,60
Concentração no ar, g/m3, mg/L	52,25	33,23	23,04	18,27
Concentração na água, g/m3, mg/L	224,72	120,54	66,27	67,61
Concentração no solo, g/m3, mg/L	263,00	426,16	512,52	535,02
Massa no ar, mg	108,70	69,13	47,93	38,01
Massa no agua, mg	63,82	34,23	18,82	19,20
Massa no solo, mg	111,48	180,64	217,25	226,79
	284,00	284,00	284,00	284,00
Concentração no ar Experimental mg/L	16,51	34,32	22,81	15,19

**Ensaio de Bio-remediação não inoculado - Xisto com B, T, E e X
(BbXT_B, BbXT_T, BbXT_E, BbXT_X)**

Altura da coluna, cm	35,50			
Diâmetro da coluna, cm	5,00			
Volume da coluna, L	2,79			
Temperatura, °K	298,15			
Altura de solo na coluna, cm	12,70			
Volume de solo granel, VM, L	1,00			
Volume de ar acima do solo, VA, L	1,79			
Massa solo seco, g	1243,00			
Densidade das partículas do solo, kg/L	2,80			
Volume de solo seco, Vs, L	0,44			
Volume de água no solo, VL	0,18			
Volume de ar no solo, VV	0,38			
Humidade volumétrica	0,18			
Porosidade com ar	0,38			
Volume total	2,79			
Fracção carbono orgânico solo	0,0050			
Fracção de argila considerada	0,0005			
Densidade a granel solo, L/kg	0,98			
	Benzeno	Tolueno	Etilbenzeno	Xileno
Kco, L/kg	67,60	204,20	446,70	457,10
Constante Henry Pa m3/mol	576,39	683,32	861,84	670,00
Ks, L/kg	0,37	1,12	2,45	2,50
Vs, m3	4,44E-04			
Vw, m3	1,78E-04			
VA, m3	2,17E-03			
Vt, m3	2,79E-03			
ZA, mol/(m3 Pa)	4,03E-04	4,03E-04	4,03E-04	4,03E-04
Zw, mol/(m3,Pa)	1,73E-03	1,46E-03	1,16E-03	1,49E-03
ZS, mol/(m3 Pa)	1,80E-03	4,59E-03	7,95E-03	1,05E-02
VsZs, mol/Pa	7,99E-07	2,04E-06	3,53E-06	4,65E-06
VwZw, mol/Pa	3,09E-07	2,60E-07	2,07E-07	2,66E-07
VaZa, mol/Pa	8,74E-07	8,74E-07	8,74E-07	8,74E-07
SUM ViZi	1,98E-06	3,17E-06	4,61E-06	5,79E-06
Massa injectada, mg	284,00	284,00	284,00	284,00
M, g/mol	78,12	92,15	106,18	106,18
Massa injectada, mol	3,64E-03	3,08E-03	2,67E-03	2,67E-03
Fugacidade, Pa	1834,59	972,23	580,08	462,21
Concentração no ar, g/m3, mg/L	57,82	36,14	24,85	19,80
Concentração na água, g/m3, mg/L	248,65	131,11	71,47	73,25
Concentração no solo, g/m3, mg/L	257,91	410,81	489,84	513,76
Massa no ar, mg	125,25	78,29	53,83	42,89
Massa no agua, mg	44,26	23,34	12,72	13,04
Massa no solo, mg	114,49	182,37	217,45	228,07
	284,00	284,00	284,00	284,00
Concentração no ar Experimental mg/L	60,76	40,89	13,67	12,57

Ensaio de Bio-remediação não inoculado - Calcário com BTEoX (BbCL_BTEoX)

Altura da coluna, cm	35,50				
Diâmetro da coluna, cm	5,00				
Volume da coluna, L	2,79				
Temperatura, °K	298,15				
Altura de solo na coluna, cm	12,00				
Volume de solo granel, VM, L	0,94				
Volume de ar acima do solo, VA, L	1,85				
Massa solo seco, g	1278,00				
Densidade das partículas do solo, kg/L	2,73				
Volume de solo seco, Vs, L	0,47				
Volume de água no solo, VL	0,14				
Volume de ar no solo, VV	0,33				
Humidade volumétrica	0,15				
Porosidade com ar	0,35				
Volume total	2,79				
Fracção carbono orgânico solo	0,0065				
Fracção de argila considerada	0,0010				
Densidade a granel solo, L/kg	1,51				
	Benzeno	Tolueno	Etilbenzeno	oXileno	
Kco, L/kg	67,60	204,20	446,70	457,10	
Constante Henry Pa m3/mol	576,39	683,32	861,84	526,00	
Ks, L/kg	0,51	1,53	3,35	3,43	
Vs, m3	4,68E-04				
Vw, m3	1,42E-04				
VA, m3	2,18E-03				
Vt, m3	2,79E-03				
ZA, mol/(m3 Pa)	4,03E-04	4,03E-04	4,03E-04	4,03E-04	
Zw, mol/(m3,Pa)	1,73E-03	1,46E-03	1,16E-03	1,90E-03	
ZS, mol/(m3 Pa)	2,40E-03	6,13E-03	1,06E-02	1,78E-02	
VsZs, mol/Pa	1,13E-06	2,87E-06	4,97E-06	8,34E-06	
VwZw, mol/Pa	2,46E-07	2,08E-07	1,65E-07	2,70E-07	
VaZa, mol/Pa	8,79E-07	8,79E-07	8,79E-07	8,79E-07	
SUM ViZi	2,25E-06	3,95E-06	6,02E-06	9,49E-06	
Massa injectada, mg	71,00	71,00	71,00	71,00	
M, g/mol	78,12	92,15	106,18	106,18	
Massa injectada, mol	9,09E-04	7,70E-04	6,69E-04	6,69E-04	
Fugacidade, Pa	403,82	194,83	111,11	70,47	
					BTEoX
Concentração no ar, g/m3, mg/L	12,73	7,24	4,76	3,02	27,75
Concentração na água, g/m3, mg/L	54,73	26,27	13,69	14,22	
Concentração no solo, g/m3, mg/L	75,85	110,00	125,37	133,31	
Massa no ar, mg	27,72	15,78	10,37	6,57	
Massa no água, mg	7,77	3,73	1,94	2,02	
Massa no solo, mg	35,51	51,49	58,69	62,41	
	71,00	71,00	71,00	71,00	
Concentração no ar Experimental mg/L	10,26	5,68	4,15	4,49	24,59

Ensaio de Bio-remediação não inoculado - Granito com BTEoX (BbSR_BTEoX)

Altura da coluna, cm	35,50				
Diâmetro da coluna, cm	5,00				
Volume da coluna, L	2,79				
Temperatura, °K	298,15				
Altura de solo na coluna, cm	15,50				
Volume de solo granel, VM, L	1,22				
Volume de ar acima do solo, VA, L	1,57				
Massa solo seco, g	1136,00				
Densidade das partículas do solo, kg/L	2,68				
Volume de solo seco, Vs, L	0,42				
Volume de água no solo, VL	0,28				
Volume de ar no solo, VV	0,51				
Humidade volumétrica	0,23				
Porosidade com ar	0,42				
Volume total	2,79				
Fracção carbono orgânico solo	0,0065				
Fracção de argila considerada	0,0025				
Densidade a granel solo, L/kg	1,17				
	Benzeno	Tolueno	Etilbenzeno	oXileno	
Kco, L/kg	67,60	204,20	446,70	457,10	
Constante Henry Pa m3/mol	576,39	683,32	861,84	526,00	
Ks, L/kg	0,61	1,84	4,02	4,12	
Vs, m3	4,24E-04				
Vw, m3	2,84E-04				
VA, m3	2,08E-03				
Vt, m3	2,79E-03				
ZA, mol/(m3 Pa)	4,03E-04	4,03E-04	4,03E-04	4,03E-04	
Zw, mol/(m3,Pa)	1,73E-03	1,46E-03	1,16E-03	1,90E-03	
ZS, mol/(m3 Pa)	2,83E-03	7,22E-03	1,25E-02	2,10E-02	
VsZs, mol/Pa	1,20E-06	3,06E-06	5,31E-06	8,89E-06	
VwZw, mol/Pa	4,93E-07	4,16E-07	3,30E-07	5,40E-07	
VaZa, mol/Pa	8,39E-07	8,39E-07	8,39E-07	8,39E-07	
SUM ViZi	2,53E-06	4,31E-06	6,47E-06	1,03E-05	
Massa injectada, mg	71,00	71,00	71,00	71,00	
M, g/mol	78,12	92,15	106,18	106,18	
Massa injectada, mol	9,09E-04	7,70E-04	6,69E-04	6,69E-04	
Fugacidade, Pa	358,89	178,62	103,29	65,09	
					BTEoX
Concentração no ar, g/m3, mg/L	11,31	6,64	4,42	2,79	25,16
Concentração na água, g/m3, mg/L	48,64	24,09	12,73	13,14	
Concentração no solo, g/m3, mg/L	79,40	118,77	137,26	145,01	
Massa no ar, mg	23,53	13,81	9,20	5,80	
Massa no agua, mg	13,81	6,84	3,61	3,73	
Massa no solo, mg	33,66	50,35	58,18	61,47	
	71,00	71,00	71,00	71,00	
Concentração no ar Experimental mg/L	12,32	7,60	12,94	6,04	38,89

Ensaio de Bio-remediação não inoculado - Xisto com BTEoX (BbXT_BTEoX)

Altura da coluna, cm	35,50				
Diâmetro da coluna, cm	5,00				
Volume da coluna, L	2,79				
Temperatura, °K	298,15				
Altura de solo na coluna, cm	12,70				
Volume de solo granel, VM, L	1,00				
Volume de ar acima do solo, VA, L	1,79				
Massa solo seco, g	1243,00				
Densidade das partículas do solo, kg/L	2,80				
Volume de solo seco, Vs, L	0,44				
Volume de água no solo, VL	0,18				
Volume de ar no solo, VV	0,38				
Humidade volumétrica	0,18				
Porosidade com ar	0,38				
Volume total	2,79				
Fracção carbono orgânico solo	0,0065				
Fracção de argila considerada	0,0005				
Densidade a granel solo, L/kg	1,42				
	Benzeno	Tolueno	Etilbenzeno	oXileno	
Kco, L/kg	67,60	204,20	446,70	457,10	
Constante Henry Pa m3/mol	576,39	683,32	861,84	526,00	
Ks, L/kg	0,47	1,43	3,13	3,20	
Vs, m3	4,44E-04				
Vw, m3	1,78E-04				
VA, m3	2,17E-03				
Vt, m3	2,79E-03				
ZA, mol/(m3 Pa)	4,03E-04	4,03E-04	4,03E-04	4,03E-04	
Zw, mol/(m3,Pa)	1,73E-03	1,46E-03	1,16E-03	1,90E-03	
ZS, mol/(m3 Pa)	2,30E-03	5,87E-03	1,02E-02	1,71E-02	
VsZs, mol/Pa	1,02E-06	2,60E-06	4,52E-06	7,57E-06	
VwZw, mol/Pa	3,09E-07	2,60E-07	2,07E-07	3,38E-07	
VaZa, mol/Pa	8,74E-07	8,74E-07	8,74E-07	8,74E-07	
SUM ViZi	2,20E-06	3,74E-06	5,60E-06	8,78E-06	
Massa injectada, mg	71,00	71,00	71,00	71,00	
M, g/mol	78,12	92,15	106,18	106,18	
Massa injectada, mol	9,09E-04	7,70E-04	6,69E-04	6,69E-04	
Fugacidade, Pa	412,24	206,11	119,48	76,12	
					BTEoX
Concentração no ar, g/m3, mg/L	12,99	7,66	5,12	3,26	29,03
Concentração na água, g/m3, mg/L	55,87	27,79	14,72	15,37	
Concentração no solo, g/m3, mg/L	74,14	111,40	129,06	137,86	
Massa no ar, mg	28,14	16,60	11,09	7,06	
Massa no agua, mg	9,95	4,95	2,62	2,74	
Massa no solo, mg	32,91	49,45	57,29	61,20	
	71,00	71,00	71,00	71,00	
Concentração no ar Experimental mg/L	11,40	7,01	4,71	4,20	27,32

Resumo

		B	T	E	X	BTEoX	"B"	"T"	"E"	oX
Calcário	Cgas_Calculada, mg L ⁻¹	50,91	28,97	19,04	15,00	27,75	12,73	7,24	4,76	3,02
	Cgas_Experimental, mg L ⁻¹	57,01	28,83	19,32	15,81	24,59	10,26	5,68	4,15	4,49
	Erro Relativo	0,11	0,00	0,01	0,05	0,13	0,24	0,27	0,15	0,33
Granito	Cgas_Calculada, mg L ⁻¹	52,25	33,23	23,04	18,27	25,16	11,31	6,64	4,42	2,79
	Cgas_Experimental, mg L ⁻¹	16,51	34,32	22,81	15,18	38,89	12,32	7,60	12,94	6,04
	Erro Relativo	2,16	0,03	0,01	0,20	0,35	0,08	0,13	0,66	0,54
Xisto	Cgas_Calculada, mg L ⁻¹	57,82	36,14	24,85	19,80	29,03	12,99	7,66	5,12	3,26
	Cgas_Experimental, mg L ⁻¹	60,76	40,89	13,67	12,57	27,32	11,40	7,01	4,71	4,20
	Erro Relativo	0,05	0,12	0,82	0,58	0,06	0,14	0,09	0,09	0,22

Nota: "B" – benzeno na mistura BTEoX, "T" – tolueno na mistura BTEoX, "E" – etilbenzeno na mistura BTEoX,

Ensaio de Bio-remediação Inoculado - Calcário com Benzeno (BCL_B)

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura da coluna, m	3,55E-01	Nome	Benzeno
Altura do solo, m	1,20E-01	Fórmula	C ₆ H ₆
Volume de ar acima do solo, L	1,85E+00	Massa Molecular	7,81E+01
		Constante Henry adimensional	2,33E-01
Composição do solo:		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	5,76E+02
Humidade volumétrica	1,50E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	6,76E+01
Porosidade volumétrica total	5,00E-01	Coeficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	3,79E+01
Fracção vazios com ar	3,50E-01	Coeficiente partilha solo-água, s, L/kg	4,40E-01
Fracção Matéria Orgânica	1,16E-02	Coeficiente partilha MM-água, s, L/kg	6,76E-02
Fracção Matéria Mineral	4,88E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	6,51E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	1,00E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,73E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	6,57E-02
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	3,20E-04
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	1,32E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,73E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	8,78E-07
Volumes:		Água, mol/Pa	2,45E-07
Solo Total, m ³	9,42E-04	Matéria Orgânica, mol/Pa	7,20E-07
Água, m ³	1,41E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	1,47E-07
Ar, m ³	3,30E-04	TOTAL	1,99E-06
Matéria Orgânica, m ³	1,10E-05		
Matéria Mineral, m ³	4,60E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	1,83E+03
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,50E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	2,84E-04	Ar, mol/m ³	7,37E-01
Quantidade total contaminante, mol	3,64E-03	Água, mol/m ³	3,17E+00
Concentração média, mg/kg	2,02E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,20E+02
Concentração média, mmol/kg	2,58E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	5,85E-01
Bio-degradação:		Massas em cada compartimento:	
Semi-vida, h	3,20E+01	Ar, mol	1,60E-03
Constante cinética, h ⁻¹	2,17E-02	Água, mol	4,48E-04
Dr, mol/(Pa,h)	2,70E-08	Matéria orgânica, mol	1,31E-03
		Matéria mineral, mol	2,69E-04
Constante Cinética Global, h ⁻¹	1,36E-02	Total	3,64E-03

Ensaio de Bio-remediação Inoculado - Calcário com Tolueno (BCL_T)

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura da coluna, m	3,55E-01	Nome	Tolueno
Altura do solo, m	1,20E-01	Fórmula	C ₇ H ₈
Volume de ar, L	1,85E+00	Massa Molecular	9,22E+01
		Constante Henry adimensional	2,76E-01
Composição do solo:		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	6,83E+02
Humidade volumétrica	1,50E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	2,04E+02
Porosidade volumétrica total	5,00E-01	Coeficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	1,14E+02
Fracção vazios com ar	3,50E-01	Coeficiente partilha solo-água, s, L/kg	1,33E+00
Fracção Matéria Orgânica	1,16E-02	Coeficiente partilha MM-água, s, L/kg	2,04E-01
Fracção Matéria Mineral	4,88E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	6,51E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	1,00E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,46E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	1,67E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	8,16E-04
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	2,70E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,73E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	8,78E-07
Volumes:		Água, mol/Pa	2,07E-07
Solo Total, m ³	9,42E-04	Matéria Orgânica, mol/Pa	1,83E-06
Água, m ³	1,41E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	3,76E-07
Ar, m ³	3,30E-04	TOTAL	3,29E-06
Matéria Orgânica, m ³	1,10E-05		
Matéria Mineral, m ³	4,60E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	9,36E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,50E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	2,84E-04	Ar, mol/m ³	3,77E-01
Quantidade total contaminante, mol	3,08E-03	Água, mol/m ³	1,37E+00
Concentração média, mg/kg	2,02E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,57E+02
Concentração média, mmol/kg	2,19E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	7,63E-01
Bio-degradação:		Massas em cada compartimento:	
Semi-vida, h	2,40E+01	Ar, mol	8,21E-04
Constante cinética,, H ⁻¹	2,89E-02	Água, mol	1,94E-04
Dr, mol/(Pa,h)	7,36E-08	Matéria orgânica, mol	1,72E-03
		Matéria mineral, mol	3,51E-04
Constante Cinética Global, h ⁻¹	2,24E-02	Total	3,08E-03

Ensaio de Bio-remediação Inoculado - Calcário com Etilbenzeno (BCL_E)

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura da coluna, m	3,55E-01	Nome	Etilbenzeno
Altura do solo, m	1,20E-01	Fórmula	C ₈ H ₁₀
Volume de ar, L	1,85E+00	Massa Molecular	1,06E+02
		Constante Henry adimensional	3,48E-01
Composição do solo:		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	8,62E+02
Humidade volumétrica	1,50E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	4,47E+02
Porosidade volumétrica total	5,00E-01	Coeficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	2,50E+02
Fracção vazios com ar	3,50E-01	Coeficiente partilha solo-água, s, L/kg	2,91E+00
Fracção Matéria Orgânica	1,16E-02	Coeficiente partilha MM-água, s, L/kg	4,47E-01
Fracção Matéria Mineral	4,88E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	6,51E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	1,00E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,16E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	2,90E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	1,41E-03
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	4,38E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,73E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	8,78E-07
Volumes:		Água, mol/Pa	1,64E-07
Solo Total, m ³	9,42E-04	Matéria Orgânica, mol/Pa	3,18E-06
Água, m ³	1,41E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	6,51E-07
Ar, m ³	3,30E-04	TOTAL	4,87E-06
Matéria Orgânica, m ³	1,10E-05		
Matéria Mineral, m ³	4,60E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	5,49E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,50E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	2,84E-04	Ar, mol/m ³	2,21E-01
Quantidade total contaminante, mol	2,67E-03	Água, mol/m ³	6,37E-01
Concentração média, mg/kg	2,02E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,59E+02
Concentração média, mmol/kg	1,90E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	7,77E-01
Bio-degradação:		Massas em cada compartimento:	
Semi-vida, h	2,40E+01	Ar, mol	4,82E-04
Constante cinética,, H ⁻¹	2,89E-02	Água, mol	9,00E-05
Dr, mol/(Pa,h)	1,19E-07	Matéria orgânica, mol	1,75E-03
		Matéria mineral, mol	3,57E-04
Constante Cinética Global, h ⁻¹	2,45E-02	Total	2,67E-03

Ensaio de Bio-remediação Inoculado - Calcário com Xileno (BCL_X)

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura da coluna, m	3,55E-01	Nome	Xileno
Altura do solo, m	1,20E-01	Fórmula	C ₈ H ₁₀
Volume de ar, L	1,85E+00	Massa Molecular	1,06E+02
		Constante Henry adimensional	2,70E-01
Composição do solo:		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	6,70E+02
Humidade volumétrica	1,50E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	4,57E+02
Porosidade volumétrica total	5,00E-01	Coeficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	2,56E+02
Fracção vazios com ar	3,50E-01	Coeficiente partilha solo-água, s, L/kg	2,98E+00
Fracção Matéria Orgânica	1,16E-02	Coeficiente partilha MM-água, s, L/kg	4,57E-01
Fracção Matéria Mineral	4,88E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	6,51E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	1,00E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,49E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	3,82E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	1,86E-03
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	5,72E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,73E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	8,78E-07
Volumes:		Água, mol/Pa	2,11E-07
Solo Total, m ³	9,42E-04	Matéria Orgânica, mol/Pa	4,19E-06
Água, m ³	1,41E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	8,58E-07
Ar, m ³	3,30E-04	TOTAL	6,14E-06
Matéria Orgânica, m ³	1,10E-05		
Matéria Mineral, m ³	4,60E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	4,36E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,50E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	2,84E-04	Ar, mol/m ³	1,76E-01
Quantidade total contaminante, mol	2,67E-03	Água, mol/m ³	6,51E-01
Concentração média, mg/kg	2,02E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,67E+02
Concentração média, mmol/kg	1,90E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	8,13E-01
Bio-degradação:		Massas em cada compartimento:	
Semi-vida, h	4,00E+01	Ar, mol	3,83E-04
Constante cinética,, H ⁻¹	1,73E-02	Água, mol	9,20E-05
Dr, mol/(Pa,h)	9,34E-08	Matéria orgânica, mol	1,83E-03
		Matéria mineral, mol	3,74E-04
Constante Cinética Global, h ⁻¹	1,52E-02	Total	2,67E-03

Ensaio de Bio-remediação Inoculado - Calcário com BTEoX (BCL_BTEoX)

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura da coluna, m	3,55E-01	Nome	BTEoX
Altura do solo, m	1,20E-01	Fórmula	
Volume de ar, L	1,85E+00	Massa Molecular	9,57E+01
		Constante Henry adimensional	2,65E-01
Composição do solo:		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	6,62E+02
Humidade volumétrica	1,50E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	2,86E+02
Porosidade volumétrica total	5,00E-01	Coeficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	1,60E+02
Fracção vazios com ar	3,50E-01	Coeficiente partilha solo-água, s, L/kg	1,86E+00
Fracção Matéria Orgânica	1,16E-02	Coeficiente partilha MM-água, s, L/kg	2,86E-01
Fracção Matéria Mineral	4,88E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	6,51E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	1,00E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,51E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	2,42E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	1,18E-03
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	3,76E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,73E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	8,78E-07
Volumes:		Água, mol/Pa	2,14E-07
Solo Total, m ³	9,42E-04	Matéria Orgânica, mol/Pa	2,65E-06
Água, m ³	1,41E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	5,44E-07
Ar, m ³	3,30E-04	TOTAL	4,29E-06
Matéria Orgânica, m ³	1,10E-05		
Matéria Mineral, m ³	4,60E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	6,92E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,50E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	2,84E-04	Ar, mol/m ³	2,79E-01
Quantidade total contaminante, mol	2,97E-03	Água, mol/m ³	1,05E+00
Concentração média, mg/kg	2,02E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,68E+02
Concentração média, mmol/kg	2,11E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	8,17E-01
Bio-degradação:		Massas em cada compartimento:	
Semi-vida, h	1,20E+01	Ar, mol	6,08E-04
Constante cinética,, H ⁻¹	5,78E-02	Água, mol	1,48E-04
Dr, mol/(Pa,h)	2,05E-07	Matéria orgânica, mol	1,84E-03
		Matéria mineral, mol	3,76E-04
Constante Cinética Global, h ⁻¹	4,77E-02	Total	2,97E-03

Ensaio de Bio-remediação Inoculado

Calcário com Benzeno (BCL_B)

Tempo (h)	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)
0	1,83E+03	5,76E+01
24	1,32E+03	4,16E+01
48	9,53E+02	3,00E+01
72	6,88E+02	2,17E+01
96	4,97E+02	1,57E+01
120	3,59E+02	1,13E+01
144	2,59E+02	8,18E+00
168	1,87E+02	5,90E+00
192	1,35E+02	4,26E+00

Ensaio de Bio-remediação Inoculado

Calcário com Tolueno (BCL_T)

Tempo (h)	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)
0	9,36E+02	3,48E+01
24	5,47E+02	2,03E+01
48	3,20E+02	1,19E+01
72	1,87E+02	6,96E+00
96	1,09E+02	4,07E+00
120	6,40E+01	2,38E+00
144	3,74E+01	1,39E+00
168	2,19E+01	8,14E-01

Ensaio de Bio-remediação Inoculado

Calcário com Etilbenzeno (BCL_E)

Tempo (h)	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)
0	5,49E+02	2,35E+01
24	3,05E+02	1,31E+01
48	1,70E+02	7,26E+00
72	9,43E+01	4,04E+00
96	5,24E+01	2,24E+00
120	2,91E+01	1,25E+00
144	1,62E+01	6,94E-01
168	9,00E+00	3,86E-01
192	5,00E+00	2,14E-01

Ensaio de Bio-remediação Inoculado

Calcário com Xileno (BCL_X)

Tempo (h)	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)
0	4,36E+02	1,87E+01
24	3,03E+02	1,30E+01
48	2,10E+02	8,99E+00
72	1,46E+02	6,24E+00
96	1,01E+02	4,33E+00
120	7,01E+01	3,00E+00
144	4,87E+01	2,08E+00
168	3,38E+01	1,45E+00
192	2,34E+01	1,00E+00
216	1,63E+01	6,97E-01
240	1,13E+01	4,83E-01
264	7,83E+00	3,35E-01
288	5,43E+00	2,33E-01
312	3,77E+00	1,61E-01
336	2,62E+00	1,12E-01
360	1,82E+00	7,78E-02

Ensaio de Bio-remediação Inoculado

Calcário com BTEoX (BCL_BTEoX)

Tempo (h)	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)
0	6,92E+02	2,67E+01
24	2,20E+02	8,50E+00
48	7,00E+01	2,70E+00
72	2,23E+01	8,59E-01
96	7,08E+00	2,73E-01
120	2,25E+00	8,69E-02
144	7,16E-01	2,76E-02
168	2,28E-01	8,79E-03
192	7,24E-02	2,79E-03
216	2,30E-02	8,89E-04
240	7,32E-03	2,83E-04
264	2,33E-03	8,99E-05
288	7,41E-04	2,86E-05

Ensaio de Bio-remediação Inoculado - Granito com Benzeno (BSR_B)

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura da coluna, m	3,55E-01	Nome	Benzeno
Altura do solo, m	1,55E-01	Fórmula	C ₆ H ₆
Volume de ar, L	1,57E+00	Massa Molecular	7,81E+01
		Constante Henry adimensional	2,33E-01
Composição do solo:		Constante Henry, Pa, m ³ /mol	5,76E+02
Humidade volumétrica	2,40E-01	Coefficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	6,76E+01
Porosidade volumétrica total	6,60E-01	Coefficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	3,79E+01
Fracção vazios com ar	4,20E-01	Coefficiente partilha solo-água, s, L/kg	2,68E-01
Fracção Matéria Orgânica	7,07E-03	Coefficiente partilha MM-água, s, L/kg	1,69E-01
Fracção Matéria Mineral	3,33E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	3,96E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	2,50E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,73E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	6,57E-02
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	7,86E-04
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	1,31E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,68E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	8,40E-07
Volumes:		Água, mol/Pa	5,07E-07
Solo Total, m ³	1,22E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	5,65E-07
Água, m ³	2,92E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	3,18E-07
Ar, m ³	5,11E-04	TOTAL	2,23E-06
Matéria Orgânica, m ³	8,61E-06		
Matéria Mineral, m ³	4,05E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	1,63E+03
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,14E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	2,84E-04	Ar, mol/m ³	6,57E-01
Quantidade total contaminante, mol	3,64E-03	Água, mol/m ³	2,83E+00
Concentração média, mg/kg	2,05E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,07E+02
Concentração média, mol/kg	2,62E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	1,28E+00
Bio-degradação:	Ensaio1	Massas em cada compartimento:	
Semi-vida, h	3,60E+02	Ar, mol	1,37E-03
Constante cinética, h ⁻¹	1,93E-03	Água, mol	8,26E-04
Dr, mol/(Pa,h)	3,07E-09	Matéria orgânica, mol	9,21E-04
		Matéria mineral, mol	5,19E-04
Constante Cinética, h ⁻¹	1,38E-03	Total	3,64E-03
	Ensaio2		
Semi-vida, h	1,80E+02		
Constante cinética, h ⁻¹	3,85E-03		
Dr, mol/(Pa,h)	6,15E-09		
Constante Cinética Global, h ⁻¹	2,76E-03		

Ensaio de Bio-remediação Inoculado - Granito com Tolueno (BSR_T) – Ensaio 1

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura da coluna, m	3,55E-01	Nome	Tolueno
Altura do solo, m	1,55E-01	Fórmula	C ₇ H ₈
Volume de ar, L	1,57E+00	Massa Molecular	9,22E+01
		Constante Henry adimensional	2,76E-01
Composição do solo:		Constante Henry, Pa, m ³ /mol	6,83E+02
Humidade volumétrica	2,40E-01	Coefficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	2,04E+02
Porosidade volumétrica total	6,60E-01	Coefficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	1,14E+02
Fracção vazios com ar	4,20E-01	Coefficiente partilha solo-água, s, L/kg	8,09E-01
Fracção Matéria Orgânica	7,07E-03	Coefficiente partilha MM-água, s, L/kg	5,11E-01
Fracção Matéria Mineral	3,33E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	3,96E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	2,50E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,46E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	1,67E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	2,00E-03
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	2,37E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,68E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	8,40E-07
Volumes:		Água, mol/Pa	4,28E-07
Solo Total, m ³	1,22E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	1,44E-06
Água, m ³	2,92E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	8,11E-07
Ar, m ³	5,11E-04	TOTAL	3,52E-06
Matéria Orgânica, m ³	8,61E-06		
Matéria Mineral, m ³	4,05E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	8,76E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,14E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	2,84E-04	Ar, mol/m ³	3,53E-01
Quantidade total contaminante, mol	3,08E-03	Água, mol/m ³	1,28E+00
Concentração média, mg/kg	2,05E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,47E+02
Concentração média, mol/kg	2,22E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	1,75E+00
Bio-degradação:		Massas em cada compartimento:	
Semi-vida, h	2,80E+02	Ar, mol	7,35E-04
Constante cinética, h ⁻¹	2,48E-03	Água, mol	3,74E-04
Dr, mol/(Pa,h)	7,14E-09	Matéria orgânica, mol	1,26E-03
		Matéria mineral, mol	7,11E-04
Constante Cinética, h ⁻¹	2,03E-03	Total	3,08E-03
Semi-vida, h	3,20E+01		
Constante cinética, h ⁻¹	2,17E-02		
Dr, mol/(Pa,h)	6,25E-08		
Constante Cinética Global, h ⁻¹	1,78E-02		

Ensaio de Bio-remediação Inoculado - Granito com Tolueno (BSR2_T) – Ensaio 2

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura da coluna, m	3,55E-01	Nome	Tolueno
Altura do solo, m	1,55E-01	Fórmula	C ₇ H ₈
Volume de ar, L	1,57E+00	Massa Molecular	9,22E+01
		Constante Henry adimensional	2,76E-01
Composição do solo:		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	6,83E+02
Humidade volumétrica	2,40E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	2,04E+02
Porosidade volumétrica total	6,60E-01	Coeficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	1,14E+02
Fracção vazios com ar	4,20E-01	Coeficiente partilha solo-água, s, L/kg	8,09E-01
Fracção Matéria Orgânica	7,07E-03	Coeficiente partilha MM-água, s, L/kg	5,11E-01
Fracção Matéria Mineral	3,33E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	3,96E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	2,50E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,46E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	1,67E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	2,00E-03
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	2,37E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,68E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	8,40E-07
Volumes:		Água, mol/Pa	4,28E-07
Solo Total, m ³	1,22E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	1,44E-06
Água, m ³	2,92E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	8,11E-07
Ar, m ³	5,11E-04	TOTAL	3,52E-06
Matéria Orgânica, m ³	8,61E-06		
Matéria Mineral, m ³	4,05E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	8,76E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,14E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	2,84E-04	Ar, mol/m ³	3,53E-01
Quantidade total contaminante, mol	3,08E-03	Água, mol/m ³	1,28E+00
Concentração média, mg/kg	2,05E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,47E+02
Concentração média, mol/kg	2,22E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	1,75E+00
Bio-degradação:		Massas em cada compartimento:	
Semi-vida, h	3,12E+02	Ar, mol	7,35E-04
Constante cinética,, H ⁻¹	2,22E-03	Água, mol	3,74E-04
Dr, mol/(Pa,h)	6,41E-09	Matéria orgânica, mol	1,26E-03
		Matéria mineral, mol	7,11E-04
Constante Cinética, h ⁻¹	1,82E-03	Total	3,08E-03
Semi-vida, h			
Constante cinética,, H ⁻¹	2,40E+01		
Dr, mol/(Pa,h)	2,89E-02		
	8,33E-08		
Constante Cinética Global, h ⁻¹	2,37E-02		

Ensaio de Bio-remediação Inoculado - Granito com Etilbenzeno (BSR_E)

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura da coluna, m	3,55E-01	Nome	Etilbenzeno
Altura do solo, m	1,55E-01	Fórmula	C ₈ H ₁₀
Volume de ar, L	1,57E+00	Massa Molecular	1,06E+02
		Constante Henry adimensional	3,48E-01
Composição do solo:		Constante Henry, Pa,m ³ /mol	8,62E+02
Humidade volumétrica	2,40E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	4,47E+02
Porosidade volumétrica total	6,60E-01	Coeficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	2,50E+02
Fracção vazios com ar	4,20E-01	Coeficiente partilha solo-água, s, L/kg	1,77E+00
Fracção Matéria Orgânica	7,07E-03	Coeficiente partilha MM-água, s, L/kg	1,12E+00
Fracção Matéria Mineral	3,33E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	3,96E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	2,50E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,16E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	2,90E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	3,47E-03
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	3,66E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,68E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	8,40E-07
Volumes:		Água, mol/Pa	3,39E-07
Solo Total, m ³	1,22E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	2,50E-06
Água, m ³	2,92E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	1,41E-06
Ar, m ³	5,11E-04	TOTAL	5,09E-06
Matéria Orgânica, m ³	8,61E-06		
Matéria Mineral, m ³	4,05E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	5,26E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,14E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	2,84E-04	Ar, mol/m ³	2,12E-01
Quantidade total contaminante, mol	2,67E-03	Água, mol/m ³	6,10E-01
Concentração média, mg/kg	2,05E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,53E+02
Concentração média, mol/kg	1,93E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	1,83E+00
Bio-degradação:		Massas em cada compartimento:	
Semi-vida, h	1,20E+02	Ar, mol	4,42E-04
Constante cinética, h ⁻¹	5,78E-03	Água, mol	1,78E-04
Dr, mol/(Pa,h)	2,57E-08	Matéria orgânica, mol	1,31E-03
		Matéria mineral, mol	7,40E-04
Constante Cinética Global, h ⁻¹	5,06E-03	Total	2,67E-03

Ensaio de Bio-remediação Inoculado - Granito com Xileno (BSR_X)

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura da coluna, m	3,55E-01	Nome	Xileno
Altura do solo, m	1,55E-01	Fórmula	C ₈ H ₁₀
Volume de ar, L	1,57E+00	Massa Molecular	1,06E+02
		Constante Henry adimensional	2,70E-01
Composição do solo:		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	6,70E+02
Humidade volumétrica	2,40E-01	Coefficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	4,57E+02
Porosidade volumétrica total	6,60E-01	Coefficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	2,56E+02
Fracção vazios com ar	4,20E-01	Coefficiente partilha solo-água, s, L/kg	1,81E+00
Fracção Matéria Orgânica	7,07E-03	Coefficiente partilha MM-água, s, L/kg	1,14E+00
Fracção Matéria Mineral	3,33E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	3,96E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	2,50E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,49E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	3,82E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	4,57E-03
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	4,75E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,68E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	8,40E-07
Volumes:		Água, mol/Pa	4,36E-07
Solo Total, m ³	1,22E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	3,29E-06
Água, m ³	2,92E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	1,85E-06
Ar, m ³	5,11E-04	TOTAL	6,42E-06
Matéria Orgânica, m ³	8,61E-06		
Matéria Mineral, m ³	4,05E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	4,17E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,14E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	2,84E-04	Ar, mol/m ³	1,68E-01
Quantidade total contaminante, mol	2,67E-03	Água, mol/m ³	6,22E-01
Concentração média, mg/kg	2,05E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,59E+02
Concentração média, mol/kg	1,93E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	1,91E+00
Bio-degradação:		Massas em cada compartimento:	
Semi-vida, h	1,44E+02	Ar, mol	3,50E-04
Constante cinética, h ⁻¹	4,81E-03	Água, mol	1,82E-04
Dr, mol/(Pa,h)	2,79E-08	Matéria orgânica, mol	1,37E-03
		Matéria mineral, mol	7,72E-04
Constante Cinética Global, h ⁻¹	4,34E-03	Total	2,67E-03

Ensaio de Bio-remediação Inoculado - Granito com BTEoX (BSR_BTEoX)

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura da coluna, m	3,55E-01	Nome	BTEoX
Altura do solo, m	1,55E-01	Fórmula	
Volume de ar, L	1,57E+00	Massa Molecular	9,57E+01
		Constante Henry adimensional	2,65E-01
Composição do solo:		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	6,62E+02
Humidade volumétrica	2,40E-01	Coefficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	2,86E+02
Porosidade volumétrica total	6,60E-01	Coefficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	1,60E+02
Fracção vazios com ar	4,20E-01	Coefficiente partilha solo-água, s, L/kg	1,13E+00
Fracção Matéria Orgânica	7,07E-03	Coefficiente partilha MM-água, s, L/kg	7,16E-01
Fracção Matéria Mineral	3,33E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	3,96E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	2,50E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,51E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	2,42E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	2,90E-03
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	3,21E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,68E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	8,40E-07
Volumes:		Água, mol/Pa	4,42E-07
Solo Total, m ³	1,22E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	2,09E-06
Água, m ³	2,92E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	1,17E-06
Ar, m ³	5,11E-04	TOTAL	4,54E-06
Matéria Orgânica, m ³	8,61E-06		
Matéria Mineral, m ³	4,05E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	6,54E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,14E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	2,84E-04	Ar, mol/m ³	2,64E-01
Quantidade total contaminante, mol	2,97E-03	Água, mol/m ³	9,88E-01
Concentração média, mg/kg	2,05E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,58E+02
Concentração média, mol/kg	2,14E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	1,89E+00
Bio-degradação:		Massas em cada compartimento:	
Semi-vida, h	2,40E+02	Ar, mol	5,49E-04
Constante cinética,, H ⁻¹	2,89E-03	Água, mol	2,89E-04
Dr, mol/(Pa,h)	1,13E-08	Matéria orgânica, mol	1,36E-03
		Matéria mineral, mol	7,68E-04
Constante Cinética Global, h ⁻¹	2,49E-03	Total	2,97E-03

Ensaio de Bio-remediação Inoculado

Granito com Benzeno

T(h)	BSR_B		BSR2_B	
	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)
0	1629,71	5,14E+01	1629,71	5,14E+01
24	1576,68	4,97E+01	1525,37	4,81E+01
48	1525,37	4,81E+01	1427,71	4,50E+01
72	1475,73	4,65E+01	1336,30	4,21E+01
96	1427,71	4,50E+01	1250,75	3,94E+01
120	1381,25	4,35E+01	1170,67	3,69E+01
144	1336,30	4,21E+01	1095,72	3,45E+01
168	1292,82	4,07E+01	1025,56	3,23E+01
192	1250,75	3,94E+01	959,90	3,03E+01
216	1210,04	3,81E+01	898,45	2,83E+01
240	1170,67	3,69E+01	840,92	2,65E+01
264	1132,57	3,57E+01	787,08	2,48E+01
288	1095,72	3,45E+01	736,69	2,32E+01
312	1060,06	3,34E+01	689,53	2,17E+01
336	1025,56	3,23E+01	645,38	2,03E+01
360	992,19	3,13E+01	604,06	1,90E+01
384	959,90	3,03E+01	565,38	1,78E+01
408	928,67	2,93E+01	529,19	1,67E+01
432	898,45	2,83E+01	495,31	1,56E+01
456	869,21	2,74E+01	463,59	1,46E+01
480	840,92	2,65E+01	433,91	1,37E+01
504	813,56	2,56E+01	406,13	1,28E+01
528	787,08	2,48E+01	380,13	1,20E+01
552	761,47	2,40E+01	355,79	1,12E+01
576	736,69	2,32E+01	333,01	1,05E+01
600	712,72	2,25E+01	311,69	9,82E+00
624	689,53	2,17E+01	291,74	9,19E+00
648	667,09	2,10E+01	273,06	8,61E+00
672	645,38	2,03E+01	255,58	8,05E+00
696	624,38	1,97E+01	239,21	7,54E+00
720	604,06	1,90E+01	223,90	7,06E+00
744	584,40	1,84E+01	209,56	6,60E+00
768	565,38	1,78E+01	196,15	6,18E+00
792	546,99	1,72E+01		

Ensaio de Bio-remediação Inoculado

Granito com Tolueno (BSR_T)

T(h)	BSR_T		BSR2_T	
	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)
0	8,76E+02	3,26E+01	8,76E+02	3,26E+01
24	8,34E+02	3,10E+01	5,72E+02	2,13E+01
48	7,94E+02	2,95E+01	3,73E+02	1,39E+01
72	7,57E+02	2,81E+01	2,44E+02	9,06E+00
96	7,21E+02	2,68E+01	1,59E+02	5,92E+00
120	6,86E+02	2,55E+01	1,04E+02	3,86E+00
144	6,54E+02	2,43E+01	6,79E+01	2,52E+00
168	6,23E+02	2,31E+01	4,43E+01	1,65E+00
192	5,93E+02	2,20E+01	2,89E+01	1,08E+00
216	5,65E+02	2,10E+01	1,89E+01	7,02E-01
240	5,38E+02	2,00E+01		
264	5,12E+02	1,90E+01		
288	4,88E+02	1,81E+01		

Ensaio de Bio-remediação Inoculado

Granito com Tolueno (BSR2_T)

T(h)	BSR2_T		BSR2_T	
	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)
0	8,76E+02	3,26E+01	8,76E+02	3,26E+01
24	8,38E+02	3,12E+01	4,96E+02	1,84E+01
48	8,02E+02	2,98E+01	2,81E+02	1,04E+01
72	7,68E+02	2,86E+01	1,59E+02	5,92E+00
96	7,35E+02	2,73E+01	9,02E+01	3,35E+00
120	7,04E+02	2,62E+01	5,11E+01	1,90E+00
144	6,74E+02	2,50E+01	2,89E+01	1,08E+00
168	6,45E+02	2,40E+01	1,64E+01	6,09E-01
192	6,17E+02	2,29E+01	9,28E+00	3,45E-01
216	5,91E+02	2,20E+01	5,26E+00	1,95E-01
240	5,66E+02	2,10E+01		
264	5,41E+02	2,01E+01		
288	5,18E+02	1,93E+01		
312	4,96E+02	1,84E+01		
336	4,75E+02	1,77E+01		
360	4,54E+02	1,69E+01		
384	4,35E+02	1,62E+01		
408	4,16E+02	1,55E+01		
432	3,99E+02	1,48E+01		
456	3,82E+02	1,42E+01		
480	3,65E+02	1,36E+01		
504	3,50E+02	1,30E+01		
528	3,35E+02	1,24E+01		
552	3,20E+02	1,19E+01		
576	3,07E+02	1,14E+01		
600	2,94E+02	1,09E+01		
624	2,81E+02	1,04E+01		

Ensaio de Bio-remediação Inoculado
Granito com Etilbenzeno (BSR_E e BSR2_E))

Tempo (h)	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)
0	5,26E+02	2,25E+01
24	4,66E+02	2,00E+01
48	4,13E+02	1,77E+01
72	3,65E+02	1,57E+01
96	3,24E+02	1,39E+01
120	2,87E+02	1,23E+01
144	2,54E+02	1,09E+01
168	2,25E+02	9,64E+00
192	1,99E+02	8,53E+00
216	1,76E+02	7,56E+00
240	1,56E+02	6,69E+00
264	1,38E+02	5,93E+00
288	1,23E+02	5,25E+00
312	1,09E+02	4,65E+00
336	9,62E+01	4,12E+00
360	8,52E+01	3,65E+00
384	7,55E+01	3,23E+00
408	6,68E+01	2,86E+00
432	5,92E+01	2,54E+00
456	5,24E+01	2,25E+00
480	4,64E+01	1,99E+00
504	4,11E+01	1,76E+00
528	3,64E+01	1,56E+00
552	3,23E+01	1,38E+00

Ensaio de Bio-remediação Inoculado
Granito com Xileno (BSR_X e BSR2_X))

Tempo (h)	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)
0	416,53	1,78E+01
24	375,34	1,61E+01
48	338,23	1,45E+01
72	304,78	1,31E+01
96	274,64	1,18E+01
120	247,48	1,06E+01
144	223,01	9,55E+00
168	200,96	8,61E+00
192	181,09	7,76E+00
216	163,18	6,99E+00
240	147,04	6,30E+00
264	132,50	5,68E+00
288	119,40	5,11E+00
312	107,59	4,61E+00
336	96,95	4,15E+00
360	87,37	3,74E+00
384	78,73	3,37E+00
408	70,94	3,04E+00
432	63,93	2,74E+00

456	57,60	2,47E+00
480	51,91	2,22E+00
504	46,78	2,00E+00
528	42,15	1,81E+00
552	37,98	1,63E+00
576	34,23	1,47E+00
600	30,84	1,32E+00
624	27,79	1,19E+00
648	25,04	1,07E+00
672	22,57	9,67E-01
696	20,34	8,71E-01
720	18,32	7,85E-01
744	16,51	7,07E-01
768	14,88	6,37E-01
792	13,41	5,74E-01
816	12,08	5,18E-01
840	10,89	4,66E-01
864	9,81	4,20E-01
888	8,84	3,79E-01
912	7,97	3,41E-01
936	7,18	3,08E-01

Ensaio de Bio-remediação Inoculado
Granito com BTEoX (BSR_BTEoX)

Tempo (h)	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)
0	6,54E+02	2,52E+01
24	6,16E+02	2,38E+01
48	5,80E+02	2,24E+01
72	5,47E+02	2,11E+01
96	5,15E+02	1,99E+01
120	4,85E+02	1,87E+01
144	4,57E+02	1,76E+01
168	4,31E+02	1,66E+01
192	4,06E+02	1,57E+01
216	3,82E+02	1,47E+01
240	3,60E+02	1,39E+01
264	3,39E+02	1,31E+01
288	3,20E+02	1,23E+01
312	3,01E+02	1,16E+01
336	2,84E+02	1,09E+01
360	2,67E+02	1,03E+01
384	2,52E+02	9,71E+00
408	2,37E+02	9,15E+00
432	2,23E+02	8,62E+00
456	2,10E+02	8,12E+00
480	1,98E+02	7,65E+00
504	1,87E+02	7,21E+00
528	1,76E+02	6,79E+00

Ensaio de Bio-remediação Inoculado - Xisto com Benzeno (BXT_B)

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura da coluna, m	3,55E-01	Nome	Benzeno
Altura do solo, m	1,27E-01	Fórmula	C ₆ H ₆
Volume de ar, L	1,79E+00	Massa Molecular	7,81E+01
		Constante Henry adimensional	2,33E-01
Composição do solo:		Constante Henry, Pa, m ³ /mol	5,76E+02
Humidade volumétrica	1,80E-01	Coefficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	6,76E+01
Porosidade volumétrica total	5,60E-01	Coefficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	3,79E+01
Fracção vazios com ar	3,80E-01	Coefficiente partilha solo-água, s, L/kg	3,37E-01
Fracção Matéria Orgânica	8,89E-03	Coefficiente partilha MM-água, s, L/kg	3,38E-02
Fracção Matéria Mineral	4,31E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	4,98E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	5,00E-04	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,73E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	6,57E-02
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	1,64E-04
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	1,12E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,80E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	8,75E-07
Volumes:		Água, mol/Pa	3,11E-07
Solo Total, m ³	9,97E-04	Matéria Orgânica, mol/Pa	5,83E-07
Água, m ³	1,80E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	7,06E-08
Ar, m ³	3,79E-04	TOTAL	1,84E-06
Matéria Orgânica, m ³	8,87E-06		
Matéria Mineral, m ³	4,30E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	1,98E+03
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,40E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	2,84E-04	Ar, mol/m ³	7,97E-01
Quantidade total contaminante, mol	3,64E-03	Água, mol/m ³	3,43E+00
Concentração média, mg/kg	2,04E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,30E+02
Concentração média, mol/kg	2,61E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	3,24E-01
Bio-degradação:		Massas em cada compartimento:	
Semi-vida, h	1,20E+01	Ar, mol	1,73E-03
Constante cinética, h ⁻¹	5,78E-02	Água, mol	6,15E-04
Dr, mol/(Pa, h)	6,46E-08	Matéria orgânica, mol	1,15E-03
		Matéria mineral, mol	1,40E-04
Constante Cinética Global, h ⁻¹	3,51E-02	Total	3,64E-03

Ensaio de Bio-remediação Inoculado - Xisto com Tolueno (BXT_T)

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura da coluna, m	3,55E-01	Nome	Tolueno
Altura do solo, m	1,27E-01	Fórmula	C ₇ H ₈
Volume de ar, L	1,79E+00	Massa Molecular	9,22E+01
		Constante Henry adimensional	2,76E-01
Composição do solo:		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	6,83E+02
Humidade volumétrica	1,80E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	2,04E+02
Porosidade volumétrica total	5,60E-01	Coeficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	1,14E+02
Fracção vazios com ar	3,80E-01	Coeficiente partilha solo-água, s, L/kg	1,02E+00
Fracção Matéria Orgânica	8,89E-03	Coeficiente partilha MM-água, s, L/kg	1,02E-01
Fracção Matéria Mineral	4,31E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	4,98E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	5,00E-04	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,46E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	1,67E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	4,18E-04
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	2,09E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,80E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	8,75E-07
Volumes:		Água, mol/Pa	2,63E-07
Solo Total, m ³	9,97E-04	Matéria Orgânica, mol/Pa	1,48E-06
Água, m ³	1,80E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	1,80E-07
Ar, m ³	3,79E-04	TOTAL	2,80E-06
Matéria Orgânica, m ³	8,87E-06		
Matéria Mineral, m ³	4,30E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	1,10E+03
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,40E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	2,84E-04	Ar, mol/m ³	4,44E-01
Quantidade total contaminante, mol	3,08E-03	Água, mol/m ³	1,61E+00
Concentração média, mg/kg	2,04E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,84E+02
Concentração média, mol/kg	2,21E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	4,60E-01
Bio-degradação:		Massas em cada compartimento:	
Semi-vida, h	6,00E+00	Ar, mol	9,63E-04
Constante cinética,, H ⁻¹	1,16E-01	Água, mol	2,89E-04
Dr, mol/(Pa,h)	2,40E-07	Matéria orgânica, mol	1,63E-03
		Matéria mineral, mol	1,98E-04
Constante Cinética Global, h ⁻¹	8,57E-02	Total	3,08E-03

Ensaio de Bio-remediação Inoculado - Xisto com Etilbenzeno (BXT_E)

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura da coluna, m	3,55E-01	Nome	Etilbenzeno
Altura do solo, m	1,27E-01	Fórmula	C ₈ H ₁₀
Volume de ar, L	1,79E+00	Massa Molecular	1,06E+02
		Constante Henry adimensional	3,48E-01
Composição do solo:		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	8,62E+02
Humidade volumétrica	1,80E-01	Coefficiente partilha carbono orgânico, Kco, L/kg	4,47E+02
Porosidade volumétrica total	5,60E-01	Coefficiente partilha MO, Kmo, L/kg	2,50E+02
Fracção vazios com ar	3,80E-01	Coefficiente partilha solo-água, s, L/kg	2,22E+00
Fracção Matéria Orgânica	8,89E-03	Coefficiente partilha MM-água, s, L/kg	2,23E-01
Fracção Matéria Mineral	4,31E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	4,98E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	5,00E-04	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,16E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	2,90E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	7,26E-04
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	3,26E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,80E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	8,75E-07
Volumes:		Água, mol/Pa	2,08E-07
Solo Total, m ³	9,97E-04	Matéria Orgânica, mol/Pa	2,57E-06
Água, m ³	1,80E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	3,12E-07
Ar, m ³	3,79E-04	TOTAL	3,97E-06
Matéria Orgânica, m ³	8,87E-06		
Matéria Mineral, m ³	4,30E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	6,74E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,40E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	2,84E-04	Ar, mol/m ³	2,72E-01
Quantidade total contaminante, mol	2,67E-03	Água, mol/m ³	7,82E-01
Concentração média, mg/kg	2,04E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,96E+02
Concentração média, mol/kg	1,92E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	4,89E-01
Bio-degradação:		Massas em cada compartimento:	
Semi-vida, h	3,60E+01	Ar, mol	5,90E-04
Constante cinética, H ⁻¹	1,93E-02	Água, mol	1,40E-04
Dr, mol/(Pa,h)	6,25E-08	Matéria orgânica, mol	1,73E-03
		Matéria mineral, mol	2,10E-04
Constante Cinética Global, h ⁻¹	1,58E-02	Total	2,67E-03

Ensaio de Bio-remediação Inoculado - Xisto com Xileno (BXT_X)

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura da coluna, m	3,55E-01	Nome	Xileno
Altura do solo, m	1,27E-01	Fórmula	C ₈ H ₁₀
Volume de ar, L	1,79E+00	Massa Molecular	1,06E+02
		Constante Henry adimensional	2,70E-01
Composição do solo:		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	6,70E+02
Humidade volumétrica	1,80E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	4,57E+02
Porosidade volumétrica total	5,60E-01	Coeficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	2,56E+02
Fracção vazios com ar	3,80E-01	Coeficiente partilha solo-água, s, L/kg	2,28E+00
Fracção Matéria Orgânica	8,89E-03	Coeficiente partilha MM-água, s, L/kg	2,29E-01
Fracção Matéria Mineral	4,31E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	4,98E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	5,00E-04	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,49E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	3,82E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	9,56E-04
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	4,23E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,80E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	8,75E-07
Volumes:		Água, mol/Pa	2,68E-07
Solo Total, m ³	9,97E-04	Matéria Orgânica, mol/Pa	3,39E-06
Água, m ³	1,80E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	4,11E-07
Ar, m ³	3,79E-04	TOTAL	4,95E-06
Matéria Orgânica, m ³	8,87E-06		
Matéria Mineral, m ³	4,30E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	5,41E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,40E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	2,84E-04	Ar, mol/m ³	2,18E-01
Quantidade total contaminante, mol	2,67E-03	Água, mol/m ³	8,08E-01
Concentração média, mg/kg	2,04E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	2,07E+02
Concentração média, mol/kg	1,92E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	5,17E-01
Bio-degradação:		Massas em cada compartimento:	
Semi-vida, h	4,00E+01	Ar, mol	4,73E-04
Constante cinética,, H ⁻¹	1,73E-02	Água, mol	1,45E-04
Dr, mol/(Pa,h)	7,32E-08	Matéria orgânica, mol	1,83E-03
		Matéria mineral, mol	2,22E-04
Constante Cinética Global, h ⁻¹	1,48E-02	Total	2,67E-03

Ensaio de Bio-remediação Inoculado - Xisto com BTEoX (BXT_BTEoX)

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura da coluna, m	3,55E-01	Nome	BTEoX
Altura do solo, m	1,27E-01	Fórmula	
Volume de ar, L	1,79E+00	Massa Molecular	9,57E+01
		Constante Henry adimensional	2,65E-01
Composição do solo:		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	6,62E+02
Humidade volumétrica	1,80E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, Kco, L/kg	2,86E+02
Porosidade volumétrica total	5,60E-01	Coeficiente partilha MO, Kmo, L/kg	1,60E+02
Fracção vazios com ar	3,80E-01	Coeficiente partilha solo-água, s, L/kg	1,43E+00
Fracção Matéria Orgânica	8,89E-03	Coeficiente partilha MM-água, s, L/kg	1,43E-01
Fracção Matéria Mineral	4,31E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	4,98E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	5,00E-04	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,51E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	2,42E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	6,06E-04
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	2,84E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,80E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	8,75E-07
Volumes:		Água, mol/Pa	2,71E-07
Solo Total, m ³	9,97E-04	Matéria Orgânica, mol/Pa	2,15E-06
Água, m ³	1,80E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	2,60E-07
Ar, m ³	3,79E-04	TOTAL	3,56E-06
Matéria Orgânica, m ³	8,87E-06		
Matéria Mineral, m ³	4,30E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	8,35E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,40E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	2,84E-04	Ar, mol/m ³	3,37E-01
Quantidade total contaminante, mol	2,97E-03	Água, mol/m ³	1,26E+00
Concentração média, mg/kg	2,04E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	2,02E+02
Concentração média, mol/kg	2,13E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	5,06E-01
Bio-degradação:		Massas em cada compartimento:	
Semi-vida, h	1,80E+01	Ar, mol	7,31E-04
Constante cinética,, H ⁻¹	3,85E-02	Água, mol	2,27E-04
Dr, mol/(Pa,h)	1,09E-07	Matéria orgânica, mol	1,79E-03
		Matéria mineral, mol	2,17E-04
Constante Cinética Global, h ⁻¹	3,07E-02	Total	2,97E-03

Ensaio de Bio-remediação Inoculado

Xisto com Benzeno (BXT_B)

Tempo (h)	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)
0	1,98E+03	6,23E+01
24	8,51E+02	2,68E+01
48	3,67E+02	1,16E+01
72	1,58E+02	4,98E+00
96	6,81E+01	2,15E+00
120	2,93E+01	9,24E-01
144	1,26E+01	3,98E-01
168	5,44E+00	1,72E-01

Ensaio de Bio-remediação Inoculado

Xisto com Tolueno (BXT_T)

Tempo (h)	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)
0	1,10E+03	4,09E+01
24	1,40E+02	5,22E+00
48	1,79E+01	6,67E-01
72	2,29E+00	8,52E-02
96	2,93E-01	1,09E-02
120	3,74E-02	1,39E-03
144	4,78E-03	1,78E-04

Ensaio de Bio-remediação Inoculado

Xisto com Etilbenzeno (BXT_E)

Tempo (h)	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)
0	6,74E+02	2,89E+01
24	4,62E+02	1,98E+01
48	3,16E+02	1,35E+01
72	2,17E+02	9,28E+00
96	1,49E+02	6,36E+00
120	1,02E+02	4,36E+00
144	6,97E+01	2,99E+00
168	4,78E+01	2,05E+00
192	3,27E+01	1,40E+00
216	2,24E+01	9,61E-01
240	1,54E+01	6,58E-01
264	1,05E+01	4,51E-01

Ensaio de Bio-remediação Inoculado

Xisto com Xileno (BXT_X)

Tempo (h)	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)
0	5,41E+02	2,32E+01
24	3,79E+02	1,62E+01
48	2,66E+02	1,14E+01
72	1,86E+02	7,98E+00
96	1,31E+02	5,60E+00
120	9,16E+01	3,92E+00
144	6,42E+01	2,75E+00
168	4,50E+01	1,93E+00
192	3,16E+01	1,35E+00
216	2,21E+01	9,48E-01
240	1,55E+01	6,64E-01
264	1,09E+01	4,66E-01
288	7,62E+00	3,27E-01
312	5,35E+00	2,29E-01

Ensaio de Bio-remediação Inoculado

Xisto com BTEoX (BXT_BTEoX)

Tempo (h)	Fugacidade	Cgas (mg L ⁻¹)
0	8,35E+02	3,22E+01
24	4,00E+02	1,54E+01
48	1,91E+02	7,39E+00
72	9,17E+01	3,54E+00
96	4,39E+01	1,69E+00
120	2,10E+01	8,11E-01
144	1,01E+01	3,88E-01
168	4,82E+00	1,86E-01
192	2,31E+00	8,90E-02
216	1,10E+00	4,26E-02
240	5,29E-01	2,04E-02
264	2,53E-01	9,77E-03
288	1,21E-01	4,68E-03
312	5,81E-02	2,24E-03
336	2,78E-02	1,07E-03

BCL_B			
Tempo (dias)	Cgas Exp (mg L ⁻¹)	Cgas Calc (mg L ⁻¹)	Δ Cgas
0,00	75,53		
1,00	71,69		
2,00	69,74		
3,00	65,94		
4,00	59,97		
5,00	54,33	57,58	3,25
6,00	48,69	41,59	7,11
7,00	40,52	30,04	10,48
8,00	23,25	21,70	1,55
9,00	15,99	15,67	0,32
10,00	5,22	11,32	6,10
11,00	0,20	8,18	7,97
12,00	0,15	5,90	5,75
13,00	0,23	4,26	4,04
		Erro Relativo	0,25

BCL_T			
Tempo (dias)	Cgas Exp (mg L ⁻¹)	Cgas Calc (mg L ⁻¹)	Δ Cgas
0,00	49,99		
1,00	48,90		
2,00	46,61		
3,00	33,68	34,79	1,11
4,00	16,61	20,34	3,73
5,00	11,18	11,90	0,72
6,00	5,74	6,96	1,22
7,00	0,71	4,07	3,36
8,00	0,30	2,38	2,08
9,00	0,13	1,39	1,26
10,00	0,06	0,81	0,75
		Erro Relativo	0,21

BCL_E			
Tempo (dias)	Cgas Exp (mg L ⁻¹)	Cgas Calc (mg L ⁻¹)	Δ Cgas
0,00	37,45		
1,00	32,69		
2,00	29,68	23,51	6,17
3,00	12,85	13,07	0,22
4,00	9,87	7,26	2,60
5,00	6,92	4,04	2,88
6,00	3,97	2,24	1,72
7,00	0,64	1,25	0,61
8,00	0,29	0,69	0,40
9,00	0,11	0,39	0,28

10,00	0,06	0,21	0,16
		Erro Relativo	0,23

BCL_X			
Tempo (dias)	Cgas Exp (mg L ⁻¹)	Cgas Calc (mg L ⁻¹)	Δ Cgas
0,00	26,15		
1,00	23,60		
2,00	19,25	18,67	0,58
3,00	11,57	12,96	1,39
4,00	8,86	8,99	0,13
5,00	6,54	6,24	0,30
6,00	4,21	4,33	0,12
7,00	1,96	3,00	1,05
8,00	0,99	2,08	1,10
9,00	0,86	1,45	0,59
10,00	0,80	1,00	0,20
11,00	0,77	0,70	0,07
12,00	0,63	0,48	0,15
13,00	0,50	0,34	0,17
14,00	0,70	0,23	0,46
15,00	0,55	0,16	0,39
16,00	0,57	0,11	0,45
17,00	0,43	0,08	0,36
		Erro Relativo	0,13

BCL_BTEoX			
Tempo (dias)	Cgas Exp (mg L ⁻¹)	Cgas Calc (mg L ⁻¹)	Δ Cgas
0,00	78,38		
1,00	37,85	26,71	11,14
2,00	8,99	8,50	0,50
3,00	6,52	2,70	3,82
4,00	1,90	0,86	1,04
5,00	1,44	0,27	1,17
6,00	0,97	0,09	0,89
7,00	0,71	0,03	0,68
8,00	0,44	0,01	0,43
9,00	0,42	0,00	0,42
10,00	0,52	0,00	0,52
11,00	0,53	0,000	0,53
12,00	0,08	0,000	0,08
13,00	0,07	0,0000	0,07
14,00	0,07		0,07
		Erro Relativo	0,35

BSR_B e BSR2_B						
Tempo	Cgas Exp1	Cgas Exp2	Cgas Calc1	Cgas Calc2	Δ Cgas1	Δ Cgas2
(dias)	(mg L ⁻¹)		(mg L ⁻¹)			
0,00	93,64	73,19				
1,00	86,39	74,92				
2,00	77,04	77,01				
3,00	78,13	74,23				
4,00	78,26	71,44				
5,00	66,66	74,06				
6,00	58,25	62,01				
7,00	59,94	58,57				
8,00	48,89	64,76				
9,00	56,68	58,45	51,36	51,36	5,32	7,09
10,00	57,16	52,91	49,69	48,07	7,47	4,84
11,00	54,00	47,37	48,07	44,99	5,93	2,38
12,00	53,82	44,38	46,51	42,11	7,31	2,27
13,00	53,63	49,56	44,99	39,42	8,64	10,15
14,00	52,44	45,70	43,53	36,89	8,91	8,81
15,00	49,76	41,85	42,11	34,53	7,64	7,32
16,00	43,55	40,03	40,74	32,32	2,81	7,71
17,00	42,50	37,08	39,42	30,25	3,09	6,83
18,00	44,71	34,14	38,13	28,31	6,57	5,83
19,00	44,36	28,93	36,89	26,50	7,46	2,43
20,00	40,82	25,52	35,69	24,80	5,12	0,72
21,00	37,27	22,11	34,53	23,22	2,74	1,10
22,00	36,15	21,72	33,41	21,73	2,75	0,01
23,00	35,11	18,12	32,32	20,34	2,79	2,22
24,00	27,64	15,11	31,27	19,04	3,63	3,93
25,00	28,36	12,10	30,25	17,82	1,89	5,72
26,00	29,09	8,39	29,27	16,68	0,18	8,29
27,00	27,04	6,73	28,31	15,61	1,27	8,88
28,00	31,16	4,28	27,39	14,61	3,76	10,33
29,00	27,84	2,21	26,50	13,67	1,34	11,46
30,00	24,53	1,03	25,64	12,80	1,11	11,77
31,00	23,38	0,39	24,80	11,98	1,43	11,59
32,00	22,22	0,08	24,00	11,21	1,78	11,13
33,00	21,86		23,22		1,35	
34,00	21,51		22,46		0,95	
35,00	19,13		21,73		2,60	
36,00	16,76		21,02		4,26	
37,00	17,75		20,34		2,59	
38,00	18,73		19,68		0,94	
39,00	17,03		19,04		2,01	
40,00	15,32		18,42		3,10	
41,00	15,07		17,82		2,75	
42,00	14,82		17,24		2,42	
Erro Relativo					0,11	0,25

BSR_T e BSR2_T						
Tempo (dias)	Cgas Exp1 (mg L ⁻¹)	Cgas Exp2 (mg L ⁻¹)	Cgas Calc1 (mg L ⁻¹)	Cgas Calc2 (mg L ⁻¹)	Δ Cgas1	Δ Cgas2
0,00	63,69	68,65				
1,00	66,41	49,58				
2,00	49,51	39,23				
3,00	55,12	36,64				
4,00	53,13	34,04				
5,00	43,36	31,55				
6,00	47,41	34,07		32,55		1,52
7,00	43,54	31,65		31,16		0,49
8,00	40,61	28,24		29,83		1,59
9,00	37,53	31,16	32,55	28,55	4,98	2,61
10,00	37,34	28,92	31,00	27,33	6,33	1,59
11,00	35,69	26,67	29,53	26,16	6,16	0,51
12,00	34,20	24,64	28,13	25,04	6,08	0,40
13,00	32,71	24,62	26,79	23,97	5,92	0,65
14,00	29,47	24,01	25,51	22,94	3,96	1,07
15,00	29,43	23,41	24,30	21,96	5,13	1,45
16,00	25,40	20,64	23,15	21,02	2,26	0,38
17,00	19,96	19,34	22,05	20,12	2,08	0,78
18,00	22,80	18,04	21,00	19,26	1,81	1,23
19,00	18,29	17,42	20,00	18,44	1,71	1,02
20,00	15,34	15,04	19,05	17,65	3,71	2,61
21,00	12,40	12,67	13,88	16,90	1,48	4,22
22,00	7,46	12,85	9,06	10,45	1,60	2,41
23,00	2,92	6,08	5,92	5,92	3,00	0,16
24,00	0,26	3,64	3,86	3,35	3,60	0,29
25,00	0,15	1,20	2,52	1,90	2,37	0,70
26,00	0,13	0,54	1,65	1,08	1,52	0,53
27,00		0,46		0,61		0,15
28,00		0,30		0,35		0,05
Erro Relativo					0,18	0,07

Tempo (dias)	BSR_E e BSR2_E					
	Cgas Exp1 (mg L ⁻¹)	Cgas Exp2 (mg L ⁻¹)	Cgas Calc1 (mg L ⁻¹)	Cgas Calc2 (mg L ⁻¹)	Δ Cgas1	Δ Cgas2
0,00	29,80	39,86				
1,00	25,94	31,10				
2,00	23,21	26,52	22,53	22,53		
3,00	18,03	23,13	19,96	19,96	1,93	3,17
4,00	16,86	18,79	17,68	17,68	0,81	1,12
5,00	15,05	20,70	15,66	15,66	0,60	5,04
6,00	13,05	18,08	13,87	13,87	0,81	4,21
7,00	12,75	15,45	12,28	12,28	0,47	3,17
8,00	13,71	16,61	10,88	10,88	2,83	5,73
9,00	12,61	14,87	9,64	9,64	2,97	5,23
10,00	10,56	13,12	8,53	8,53	2,03	4,59
11,00	9,64	11,28	7,56	7,56	2,08	3,72
12,00	10,33	9,05	6,69	6,69	3,64	2,36
13,00	11,03	8,94	5,93	5,93	5,10	3,01
14,00	9,96	7,27	5,25	5,25	4,71	2,02
15,00	8,26	6,83	4,65	4,65	3,61	2,18
16,00	7,42	5,67	4,12	4,12	3,30	1,55
17,00	6,58	3,47	3,65	3,65	2,93	0,18
18,00	5,44	2,57	3,23	3,23	2,21	0,66
19,00	4,43	1,84	2,86	2,86	1,56	1,02
20,00	2,86	1,01	2,54	2,54	0,32	1,52
21,00	1,28	0,32	2,25	2,25	0,96	1,93
22,00	0,70	0,37	1,99	1,99	1,29	1,62
23,00	0,67		1,76		0,67	
24,00	0,57		1,56		0,57	
25,00	0,38		1,38		0,38	
26,00	0,22		1,22		0,22	
27,00	0,16		1,08		0,16	
Erro Relativo					0,24	0,27

BSR_X e BSR2_X						
Tempo (dias)	Cgas Exp1 (mg L ⁻¹)	Cgas Exp2 (mg L ⁻¹)	Cgas Calc1 (mg L ⁻¹)	Cgas Calc2 (mg L ⁻¹)	Δ Cgas1	Δ Cgas2
0,00	24,94	26,49				
1,00	24,55	31,47				
2,00	18,99	16,64				
3,00	17,55	16,83	17,84	17,84	0,30	1,01
4,00	17,43	15,16	16,08	16,08	1,35	0,92
5,00	12,19	17,40	14,49	14,49	2,29	2,92
6,00	11,87	15,50	13,06	13,06	1,19	2,45
7,00	11,94	12,87	11,76	11,76	0,18	1,11
8,00	10,48	10,47	10,60	10,60	0,12	0,13
9,00	8,55	9,00	9,55	9,55	1,01	0,55
10,00	8,23	7,87	8,61	8,61	0,38	0,74
11,00	8,08	6,96	7,76	7,76	0,32	0,79
12,00	7,39	6,35	6,99	6,99	0,40	0,64
13,00	6,71	5,71	6,30	6,30	0,41	0,59
14,00	5,98	4,80	5,68	5,68	0,30	0,87
15,00	5,90	3,80	5,11	5,11	0,78	1,31
16,00	4,57	2,99	4,61	4,61	0,04	1,62
17,00	4,06	2,94	4,15	4,15	0,09	1,21
18,00	2,92	2,89	3,74	3,74	0,83	0,85
19,00	2,20	2,85	3,37	3,37	1,17	0,52
20,00	1,88	2,74	3,04	3,04	1,16	0,30
21,00	1,57	2,62	2,74	2,74	1,17	0,12
22,00	1,53	2,59	2,47	2,47	0,94	0,12
23,00	1,53	2,37	2,22	2,22	0,69	0,15
24,00	1,56	2,24	2,00	2,00	0,44	0,24
25,00	1,44	2,11	1,81	1,81	0,37	0,31
26,00	1,31	1,96	1,63	1,63	0,31	0,33
27,00	1,29	1,97	1,47	1,47	0,17	0,50
28,00	1,39	1,97	1,32	1,32	0,07	0,65
29,00	1,31	1,96	1,19	1,19	0,12	0,77
30,00	1,22	1,86	1,07	1,07	0,15	0,79
31,00	1,15	1,76	0,97	0,97	0,18	0,79
32,00	1,07	1,68	0,87	0,87	0,20	0,81
33,00	0,99	1,64	0,78	0,78	0,21	0,86
34,00	0,91	1,64	0,71	0,71	0,21	0,93
35,00	0,95	1,21	0,64	0,64	0,32	0,58
36,00	1,00	1,23	0,57	0,57	0,42	0,66
37,00	1,07	1,04	0,52	0,52	0,55	0,52
38,00	1,14	0,73	0,47	0,47	0,67	0,26
39,00	1,09	1,01	0,42	0,42	0,67	0,59
40,00	1,04	0,88	0,38	0,38	0,66	0,50
41,00	0,98	0,90	0,34	0,34	0,64	0,56
42,00	0,92	0,83	0,31	0,31	0,61	0,52
Erro Relativo					0,13	0,16

BSR_BTEoX			
Tempo (dias)	Cgas Exp (mg L ⁻¹)	Cgas Calc (mg L ⁻¹)	Δ Cgas1
0,00	65,09		
1,00	50,56		
2,00	43,56		
3,00	38,68		
4,00	58,92		
5,00	56,44		
6,00	53,96		
7,00	43,59		
8,00	33,22	25,23	7,99
9,00	30,69	23,77	6,93
10,00	30,28	22,39	7,89
11,00	29,80	21,09	8,71
12,00	30,15	19,87	10,27
13,00	32,25	18,72	13,53
14,00	25,11	17,64	7,47
15,00	24,01	16,62	7,40
16,00	22,91	15,65	7,26
17,00	24,44	14,75	9,69
18,00	20,58	13,89	6,69
19,00	16,73	13,09	3,64
20,00	15,21	12,33	2,88
21,00	14,62	11,62	3,00
22,00	14,03	10,95	3,08
23,00	11,10	10,31	0,79
24,00	8,18	9,71	1,53
25,00	5,99	9,15	3,17
26,00	3,79	8,62	4,83
27,00	2,47	8,12	5,66
28,00	1,14	7,65	6,51
29,00	0,67	7,21	6,54
30,00	0,20	6,79	6,60
		Erro Relativo	0,36

BXT_B				BXT_X			
Tempo (dias)	Cgas Exp (mg L ⁻¹)	Cgas Calc (mg L ⁻¹)	Δ Cgas	Tempo (dias)	Cgas Exp (mg L ⁻¹)	Cgas Calc (mg L ⁻¹)	Δ Cgas
0,00	116,1587			0,00	39,1000		
1,00	103,6094			1,00	27,8000		
2,00	96,8907	62,2668	34,62	2,00	21,1700		
3,00	43,4085	26,8270	16,58	3,00	18,0000	23,1657	5,17
4,00	2,3391	11,5581	9,22	4,00	16,1000	16,2409	0,14
5,00	1,4458	4,9797	3,53	5,00	15,2000	11,3861	3,81
6,00	0,6964	2,1455	1,45	6,00	9,2000	7,9825	1,22
7,00	0,2840	0,9243	0,64	7,00	7,1000	5,5963	1,50
8,00	0,2872	0,3982	0,11	8,00	3,1000	3,9235	0,82
9,00	0,1770	0,1716	0,01	9,00	2,6000	2,7506	0,15
		Erro Relativo	0,45	10,00	1,9000	1,9284	0,03
				11,00	2,1000	1,3520	0,75
				12,00	1,5000	0,9478	0,55
				13,00	0,6000	0,6645	0,06
				14,00	0,6000	0,4659	0,13
				15,00	0,5000	0,3266	0,17
				16,00	0,4000	0,2290	0,17
						Erro Relativo	0,19
BXT_T				BXT_BTEoX			
Tempo (dias)	Cgas Exp (mg L ⁻¹)	Cgas Calc (mg L ⁻¹)	Δ Cgas	Tempo (dias)	Cgas Exp (mg L ⁻¹)	Cgas Calc (mg L ⁻¹)	Δ Cgas
0,00	74,8800			0,00	74,5256		
1,00	70,2000			1,00	55,0534		
2,00	64,4000			2,00	52,3774		
3,00	59,5000			3,00	48,8323		
4,00	51,4000			4,00	54,6840		
5,00	48,0000	40,8833	7,12	5,00	51,9978		
6,00	4,2000	5,2219	1,02	6,00	49,3116		
7,00	1,4000	0,6670	0,73	7,00	34,9464	32,2199	2,73
8,00	0,7000	0,0852	0,61	8,00	20,5812	15,4274	5,15
9,00	0,3000	0,0109	0,29	9,00	4,7934	7,3869	2,59
10,00	0,2000	0,0014	0,20	10,00	2,8286	3,5369	0,71
11,00	0,2000	0,0002	0,20	11,00	1,9212	1,6935	0,23
		Erro Relativo	0,18	12,00	0,9563	0,8109	0,15
				13,00	1,3848	0,3883	1,00
				14,00	0,2977	0,1859	0,11
				15,00	0,4424	0,0890	0,35
				16,00	0,5870	0,0426	0,54
				17,00	0,7751	0,0204	0,75
				18,00	0,4688	0,0098	0,46
				19,00	0,1624	0,0047	0,16
				20,00	0,1306	0,0022	0,13
				21,00	0,0988	0,0011	0,10
						Erro Relativo	0,22
BXT_E							
Tempo (dias)	Cgas Exp (mg L ⁻¹)	Cgas Calc (mg L ⁻¹)	Δ Cgas				
0,00	36,9695						
1,00	27,0873	28,8572	1,77				
2,00	21,8570	19,7735	2,08				
3,00	14,6231	13,5492	1,07				
4,00	8,4754	9,2841	0,81				
5,00	3,7831	6,3617	2,58				
6,00	2,2124	4,3591	2,15				
7,00	1,5581	2,9870	1,43				
8,00	1,0503	2,0467	1,00				
9,00	0,7772	1,4024	0,63				
10,00	0,4076	0,9610	0,55				
11,00	0,3855	0,6585	0,27				
12,00	0,3252	0,4512	0,13				
		Erro Relativo	0,18				

**Ensaio de Bio-ventilação - Calcário com Benzeno
(BVbCL_B e BVCL_B)**

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura interna da coluna, m	5,00E-01	Nome	Benzeno
Altura do solo, m	1,70E-01	Fórmula	C ₆ H ₆
Volume de ar, L	2,59E+00	Massa Molecular	7,81E+01
		Constante Henry adimensional	2,33E-01
		Constante Henry, Pa,m ³ /mol	5,76E+02
Composição do solo:		Coeficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	6,76E+01
Humidade volumétrica	1,50E-01	Coeficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	3,79E+01
Porosidade volumétrica total	5,00E-01	Coeficiente partilha solo-água, L/kg	4,40E-01
Fracção vazios com ar	3,50E-01	Coeficiente partilha MM-água, L/kg	6,76E-02
Fracção Matéria Orgânica	1,16E-02		
Fracção Matéria Mineral	4,88E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	6,51E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	1,00E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,73E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	6,57E-02
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	3,20E-04
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	1,32E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,73E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	1,23E-06
Volumes:		Água, mol/Pa	3,47E-07
Solo Total, m ³	1,34E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	1,02E-06
Água, m ³	2,00E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	2,09E-07
Ar, m ³	4,67E-04	TOTAL	2,81E-06
Matéria Orgânica, m ³	1,55E-05		
Matéria Mineral, m ³	6,52E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	1,82E+03
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,50E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	4,00E-04	Ar, mol/m ³	7,35E-01
Quantidade total contaminante, mol	5,12E-03	Água, mol/m ³	3,16E+00
Concentração média, mg/kg	2,00E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,20E+02
Concentração média, mmol/kg	2,56E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	5,83E-01
		Massas em cada compartimento:	
		Ar, mol	2,25E-03
		Água, mol	6,33E-04
		Matéria orgânica, mol	1,86E-03
		Matéria mineral, mol	3,80E-04
		TOTAL	5,12E-03
		BVbCL_B	BVCL_B
Semi-vida, h	9,60E+01	3,60E+01	
Constante cinética,, h ⁻¹	7,22E-03	1,93E-02	
Dr, mol/(Pa,h)	1,27E-08	3,40E-08	
Constante Cinética Global, h ⁻¹	4,53E-03	1,21E-02	
Vol. ar extraído diariamente, m ³		3,00E-04	

**Ensaio de Bio-ventilação - Calcário com Tolueno
(BVbCL_T e BVCL_T)**

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura interna da coluna, m	5,00E-01	Nome	Tolueno
Altura do solo, m	1,70E-01	Fórmula	C ₇ H ₈
Volume de ar, L	2,59E+00	Massa Molecular	9,22E+01
		Constante Henry adimensional	2,76E-01
Composição do solo:		Constante Henry, Pa,m ³ /mol	6,83E+02
Humidade volumétrica	1,50E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	2,04E+02
Porosidade volumétrica total	5,00E-01	Coeficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	1,14E+02
Fracção vazios com ar	3,50E-01	Coeficiente partilha solo-água, L/kg	1,33E+00
Fracção Matéria Orgânica	1,16E-02	Coeficiente partilha MM-água, L/kg	2,04E-01
Fracção Matéria Mineral	4,88E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	6,51E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	1,00E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,46E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	1,67E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	8,16E-04
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	2,70E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,73E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	1,23E-06
Volumes:		Água, mol/Pa	2,93E-07
Solo Total, m ³	1,34E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	2,60E-06
Água, m ³	2,00E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	5,32E-07
Ar, m ³	4,67E-04	TOTAL	4,66E-06
Matéria Orgânica, m ³	1,55E-05		
Matéria Mineral, m ³	6,52E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	9,32E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,50E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	4,00E-04	Ar, mol/m ³	3,76E-01
Quantidade total contaminante, mol	4,34E-03	Água, mol/m ³	1,36E+00
Concentração média, mg/kg	2,00E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,56E+02
Concentração média, mmol/kg	2,17E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	7,60E-01
		Massas em cada compartimento:	
		Ar, mol	1,15E-03
		Água, mol	2,73E-04
		Matéria orgânica, mol	2,42E-03
		Matéria mineral, mol	4,96E-04
		TOTAL	4,34E-03
		BVbCL_T	BVCL_T
Semi-vida, h	1,68E+02		3,00E+01
Constante cinética,, h ⁻¹	4,13E-03		2,31E-02
Dr, mol/(Pa,h)	1,49E-08		8,34E-08
Constante Cinética Global, h ⁻¹	3,20E-03		1,79E-02
Vol. ar extraído diariamente, m ³		3,00E-04	

**Ensaio de Bio-ventilação - Calcário com Etilbenzeno
(BVbCL_E e BVCL_E)**

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura interna da coluna, m	5,00E-01	Nome	Etilbenzeno
Altura do solo, m	1,70E-01	Fórmula	C ₈ H ₁₀
Volume de ar, L	2,59E+00	Massa Molecular	1,06E+02
		Constante Henry adimensional	3,48E-01
Composição do solo:		Constante Henry, Pa, m ³ /mol	8,62E+02
Humidade volumétrica	1,50E-01	Coefficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	4,47E+02
Porosidade volumétrica total	5,00E-01	Coefficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	2,50E+02
Fracção vazios com ar	3,50E-01	Coefficiente partilha solo-água, L/kg	2,91E+00
Fracção Matéria Orgânica	1,16E-02	Coefficiente partilha MM-água, L/kg	4,47E-01
Fracção Matéria Mineral	4,88E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	6,51E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	1,00E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,16E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	2,90E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	1,41E-03
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	4,38E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,73E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	1,23E-06
Volumes:		Água, mol/Pa	2,32E-07
Solo Total, m ³	1,34E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	4,51E-06
Água, m ³	2,00E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	9,23E-07
Ar, m ³	4,67E-04	TOTAL	6,89E-06
Matéria Orgânica, m ³	1,55E-05		
Matéria Mineral, m ³	6,52E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	5,46E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,50E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	4,00E-04	Ar, mol/m ³	2,20E-01
Quantidade total contaminante, mol	3,77E-03	Água, mol/m ³	6,34E-01
Concentração média, mg/kg	2,00E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,59E+02
Concentração média, mmol/kg	1,89E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	7,73E-01
		Massas em cada compartimento:	
		Ar, mol	6,74E-04
		Água, mol	1,27E-04
		Matéria orgânica, mol	2,46E-03
		Matéria mineral, mol	5,04E-04
		TOTAL	3,77E-03
		BVbCL_E	BVCL_E
Semi-vida, h		1,44E+02	1,80E+01
Constante cinética,, h ⁻¹		4,81E-03	3,85E-02
Dr, mol/(Pa,h)		2,82E-08	2,25E-07
Constante Cinética Global, h ⁻¹		4,08E-03	3,27E-02
Vol. ar extraído diariamente, m ³		3,00E-04	

**Ensaio de Bio-ventilação - Calcário com Xileno
(BVbCL_X e BVCL_X)**

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura interna da coluna, m	5,00E-01	Nome	Xileno
Altura do solo, m	1,70E-01	Fórmula	C8H10
Volume de ar, L	2,59E+00	Massa Molecular	1,06E+02
		Constante Henry adimensional	2,23E-01
Composição do solo:		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	5,76E+02
Humidade volumétrica	1,50E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, Kco, L/kg	4,57E+02
Porosidade volumétrica total	5,00E-01	Coeficiente partilha MO, Kmo, L/kg	2,56E+02
Fracção vazios com ar	3,50E-01	Coeficiente partilha solo-água, L/kg	2,98E+00
Fracção Matéria Orgânica	1,16E-02	Coeficiente partilha MM-água, L/kg	4,57E-01
Fracção Matéria Mineral	4,88E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	6,51E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	1,00E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,73E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	4,44E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	2,17E-03
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	6,62E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,73E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	1,23E-06
Volumes:		Água, mol/Pa	3,47E-07
Solo Total, m ³	1,34E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	6,89E-06
Água, m ³	2,00E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	1,41E-06
Ar, m ³	4,67E-04	TOTAL	9,89E-06
Matéria Orgânica, m ³	1,55E-05		
Matéria Mineral, m ³	6,52E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	3,81E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,50E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	4,00E-04	Ar, mol/m ³	1,54E-01
Quantidade total contaminante, mol	3,77E-03	Água, mol/m ³	6,61E-01
Concentração média, mg/kg	2,00E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,69E+02
Concentração média, mmol/kg	1,89E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	8,25E-01
		Massas em cada compartimento:	
		Ar, mol	4,70E-04
		Água, mol	1,32E-04
		Matéria orgânica, mol	2,63E-03
		Matéria mineral, mol	5,38E-04
		TOTAL	3,77E-03
		BVbCL_X	BVCL_X
Semi-vida, h	5,00E+02		2,40E+01
Constante cinética,, h ⁻¹	1,39E-03		2,89E-02
Dr, mol/(Pa,h)	1,23E-08		2,55E-07
Constante Cinética Global, h ⁻¹	1,24E-03		2,58E-02
Vol. ar extraído diariamente, m ³		3,00E-04	

**Ensaio de Bio-ventilação - Calcário com BTEoX
(BVbCL_BTEoX e BVCL_BTEoX)**

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura interna da coluna, m	5,00E-01	Nome	BTEoX
Altura do solo, m	1,70E-01	Fórmula	
Volume de ar, L	2,59E+00	Massa Molecular	9,57E+01
		Constante Henry adimensional	2,65E-01
Composição do solo:		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	6,62E+02
Humidade volumétrica	1,50E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, Kco, L/kg	2,86E+02
Porosidade volumétrica total	5,00E-01	Coeficiente partilha MO, Kmo, L/kg	1,60E+02
Fracção vazios com ar	3,50E-01	Coeficiente partilha solo-água, L/kg	1,86E+00
Fracção Matéria Orgânica	1,16E-02	Coeficiente partilha MM-água, L/kg	2,86E-01
Fracção Matéria Mineral	4,88E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	6,51E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	1,00E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,51E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	2,42E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	1,18E-03
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	3,76E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,73E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	1,23E-06
Volumes:		Água, mol/Pa	3,03E-07
Solo Total, m ³	1,34E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	3,76E-06
Água, m ³	2,00E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	7,70E-07
Ar, m ³	4,67E-04	TOTAL	6,07E-06
Matéria Orgânica, m ³	1,55E-05		
Matéria Mineral, m ³	6,52E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	6,89E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,50E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	4,00E-04	Ar, mol/m ³	2,78E-01
Quantidade total contaminante, mol	4,18E-03	Água, mol/m ³	1,04E+00
Concentração média, mg/kg	2,00E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,67E+02
Concentração média, mmol/kg	2,09E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	8,14E-01
		Massas em cada compartimento:	
		Ar, mol	8,51E-04
		Água, mol	2,09E-04
		Matéria orgânica, mol	2,59E-03
		Matéria mineral, mol	5,31E-04
		TOTAL	4,18E-03
	BVbCL_BTEoX	BVCL_BTEoX	
Semi-vida, h	1,68E+02	1,20E+01	
Constante cinética,, h ⁻¹	4,13E-03	5,78E-02	
Dr, mol/(Pa,h)	2,07E-08	2,90E-07	
Constante Cinética Global, h ⁻¹	3,41E-03	4,78E-02	
Vol. ar extraído diariamente, m ³		3,00E-04	

Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado Calcário com Benzeno (BVbCL_B)		Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado Calcário com Tolueno (BVbCL_T)	
Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	1,82E+03	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	9,32E+02
Fugacidade, Pa	1,63E+03	Fugacidade, Pa	8,63E+02
Concentração no ar, mol/m ³	6,59E-01	Concentração no ar, mol/m ³	3,48E-01
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	4,39E-03	Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,92E-03
Fugacidade inicial no 2º dia, Pa	1,56E+03	Fugacidade inicial no 2º dia, Pa	8,41E+02
Fugacidade, Pa	1,40E+03	Fugacidade, Pa	7,79E+02
Concentração no ar, mol/m ³	5,66E-01	Concentração no ar, mol/m ³	3,14E-01
Massa contaminante ao fim de 2 dias	3,77E-03	Massa contaminante ao fim de 2 dias	3,53E-03
Fugacidade inicial no 3º dia, Pa	1,34E+03	Fugacidade inicial no 3º dia, Pa	7,58E+02
Fugacidade, Pa	1,20E+03	Fugacidade, Pa	7,02E+02
Concentração no ar, mol/m ³	4,86E-01	Concentração no ar, mol/m ³	2,83E-01
Massa contaminante ao fim de 3 dias	3,24E-03	Massa contaminante ao fim de 3 dias	3,19E-03
Fugacidade inicial no 4º dia, Pa	1,15E+03	Fugacidade inicial no 4º dia, Pa	6,84E+02
Fugacidade, Pa	1,03E+03	Fugacidade, Pa	6,33E+02
Concentração no ar, mol/m ³	4,17E-01	Concentração no ar, mol/m ³	2,56E-01
Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,78E-03	Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,87E-03
Fugacidade inicial no 5º dia, Pa	9,88E+02	Fugacidade inicial no 5º dia, Pa	6,17E+02
Fugacidade, Pa	8,86E+02	Fugacidade, Pa	5,71E+02
Concentração no ar, mol/m ³	3,58E-01	Concentração no ar, mol/m ³	2,31E-01
Massa contaminante ao fim de 5 dias	2,38E-03	Massa contaminante ao fim de 5 dias	2,59E-03
Fugacidade inicial no 6º dia, Pa	8,48E+02	Fugacidade inicial no 6º dia, Pa	5,57E+02
Fugacidade, Pa	7,61E+02	Fugacidade, Pa	5,15E+02
Concentração no ar, mol/m ³	3,07E-01	Concentração no ar, mol/m ³	2,08E-01
Massa contaminante ao fim de 6 dias	2,05E-03	Massa contaminante ao fim de 6 dias	2,34E-03
Fugacidade inicial no 7º dia, Pa	7,28E+02	Fugacidade inicial no 7º dia, Pa	5,02E+02
Fugacidade, Pa	6,53E+02	Fugacidade, Pa	4,65E+02
Concentração no ar, mol/m ³	2,63E-01	Concentração no ar, mol/m ³	1,88E-01
Massa contaminante ao fim de 7 dias	1,76E-03	Massa contaminante ao fim de 7 dias	2,11E-03
Fugacidade inicial no 8º dia, Pa	6,25E+02	Fugacidade inicial no 8º dia, Pa	4,53E+02
Fugacidade, Pa	5,60E+02	Fugacidade, Pa	4,19E+02
Concentração no ar, mol/m ³	2,26E-01	Concentração no ar, mol/m ³	1,69E-01
Massa contaminante ao fim de 8 dias	1,51E-03	Massa contaminante ao fim de 8 dias	1,90E-03
Fugacidade inicial no 9º dia, Pa	5,36E+02	Fugacidade inicial no 9º dia, Pa	4,08E+02
Fugacidade, Pa	4,81E+02	Fugacidade, Pa	3,78E+02
Concentração no ar, mol/m ³	1,94E-01	Concentração no ar, mol/m ³	1,53E-01
Massa contaminante ao fim de 9 dias	1,29E-03	Massa contaminante ao fim de 9 dias	1,72E-03
Fugacidade inicial no 10º dia, Pa	4,60E+02	Fugacidade inicial no 10º dia, Pa	3,68E+02
Fugacidade, Pa	4,13E+02	Fugacidade, Pa	3,41E+02
Concentração no ar, mol/m ³	1,66E-01	Concentração no ar, mol/m ³	1,38E-01
Massa contaminante ao fim de 10 dias	1,11E-03	Massa contaminante ao fim de 10 dias	1,55E-03
Fugacidade inicial no 11º dia, Pa	3,95E+02		
Fugacidade, Pa	3,54E+02		
Concentração no ar, mol/m ³	1,43E-01		
Massa contaminante ao fim de 11 dias	9,52E-04		

Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado Calcário com Etilbenzeno (BVbCL_E)		Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado Calcário com Xileno (BVbCL_X)	
Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	5,46E+02	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	3,81E+02
Fugacidade, Pa	4,95E+02	Fugacidade, Pa	3,70E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,00E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,49E-01
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,36E-03	Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,61E-03
Fugacidade inicial no 2º dia, Pa	4,87E+02	Fugacidade inicial no 2º dia, Pa	3,65E+02
Fugacidade, Pa	4,41E+02	Fugacidade, Pa	3,55E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,78E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,43E-01
Massa contaminante ao fim de 2 dias	2,99E-03	Massa contaminante ao fim de 2 dias	3,46E-03
Fugacidade inicial no 3º dia, Pa	4,33E+02	Fugacidade inicial no 3º dia, Pa	3,50E+02
Fugacidade, Pa	3,93E+02	Fugacidade, Pa	3,40E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,59E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,37E-01
Massa contaminante ao fim de 3 dias	2,66E-03	Massa contaminante ao fim de 3 dias	3,32E-03
Fugacidade inicial no 4º dia, Pa	3,86E+02	Fugacidade inicial no 4º dia, Pa	3,36E+02
Fugacidade, Pa	3,50E+02	Fugacidade, Pa	3,26E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,41E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,32E-01
Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,37E-03	Massa contaminante ao fim de 4 dias	3,18E-03
Fugacidade inicial no 5º dia, Pa	3,44E+02	Fugacidade inicial no 5º dia, Pa	3,22E+02
Fugacidade, Pa	3,12E+02	Fugacidade, Pa	3,13E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,26E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,26E-01
Massa contaminante ao fim de 5 dias	2,11E-03	Massa contaminante ao fim de 5 dias	3,05E-03
Fugacidade inicial no 6º dia, Pa	3,06E+02	Fugacidade inicial no 6º dia, Pa	3,09E+02
Fugacidade, Pa	2,78E+02	Fugacidade, Pa	3,00E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,12E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,21E-01
Massa contaminante ao fim de 6 dias	1,88E-03	Massa contaminante ao fim de 6 dias	2,93E-03
Fugacidade inicial no 7º dia, Pa	2,73E+02	Fugacidade inicial no 7º dia, Pa	2,96E+02
Fugacidade, Pa	2,47E+02	Fugacidade, Pa	2,87E+02
Concentração no ar, mol/m3	9,98E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,16E-01
Massa contaminante ao fim de 7 dias	1,67E-03	Massa contaminante ao fim de 7 dias	2,81E-03
Fugacidade inicial no 8º dia, Pa	1,78E-01	Fugacidade inicial no 8º dia, Pa	2,84E+02
Fugacidade, Pa	2,43E+02	Fugacidade, Pa	2,76E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,20E+02	Concentração no ar, mol/m3	1,11E-01
Massa contaminante ao fim de 8 dias	8,89E-02	Massa contaminante ao fim de 8 dias	2,69E-03
Fugacidade inicial no 9º dia, Pa	1,49E-03	Fugacidade inicial no 9º dia, Pa	2,72E+02
Fugacidade, Pa	2,16E+02	Fugacidade, Pa	2,64E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,96E+02	Concentração no ar, mol/m3	1,07E-01
Massa contaminante ao fim de 9 dias	7,91E-02	Massa contaminante ao fim de 9 dias	2,58E-03
Fugacidade inicial no 10º dia, Pa	1,33E-03	Fugacidade inicial no 10º dia, Pa	2,61E+02
Fugacidade, Pa	1,93E+02	Fugacidade, Pa	2,53E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,75E+02	Concentração no ar, mol/m3	1,02E-01
Massa contaminante ao fim de 10 dias	7,05E-02	Massa contaminante ao fim de 10 dias	2,47E-03
Fugacidade inicial no 11º dia, Pa	1,18E-03	Fugacidade inicial no 11º dia, Pa	2,50E+02
Fugacidade, Pa	1,72E+02	Fugacidade, Pa	2,43E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,56E+02	Concentração no ar, mol/m3	9,80E-02
Massa contaminante ao fim de 11 dias	6,28E-02	Massa contaminante ao fim de 11 dias	2,37E-03
		Fugacidade inicial no 12º dia, Pa	2,40E+02
		Fugacidade, Pa	2,33E+02
		Concentração no ar, mol/m3	9,39E-02
		Massa contaminante ao fim de 12 dias	2,27E-03

**Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado
Calcário com BTEoX (BVbCL_BTEoX)**

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	6,89E+02
Fugacidade, Pa	6,35E+02
Concentração no ar, mol/m ³	2,56E-01
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,78E-03
Fugacidade inicial no 2º dia, Pa	6,22E+02
Fugacidade, Pa	5,73E+02
Concentração no ar, mol/m ³	2,31E-01
Massa contaminante ao fim de 2 dias	3,41E-03
Fugacidade inicial no 3º dia, Pa	5,62E+02
Fugacidade, Pa	5,18E+02
Concentração no ar, mol/m ³	2,09E-01
Massa contaminante ao fim de 3 dias	3,08E-03
Fugacidade inicial no 4º dia, Pa	5,07E+02
Fugacidade, Pa	4,67E+02
Concentração no ar, mol/m ³	1,89E-01
Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,78E-03
Fugacidade inicial no 5º dia, Pa	4,58E+02
Fugacidade, Pa	4,22E+02
Concentração no ar, mol/m ³	1,70E-01
Massa contaminante ao fim de 5 dias	2,51E-03
Fugacidade inicial no 6º dia, Pa	4,14E+02
Fugacidade, Pa	3,81E+02
Concentração no ar, mol/m ³	1,54E-01
Massa contaminante ao fim de 6 dias	2,27E-03
Fugacidade inicial no 7º dia, Pa	3,73E+02
Fugacidade, Pa	3,44E+02
Concentração no ar, mol/m ³	1,39E-01
Massa contaminante ao fim de 7 dias	2,05E-03
Fugacidade inicial no 8º dia, Pa	3,37E+02
Fugacidade, Pa	3,11E+02
Concentração no ar, mol/m ³	1,25E-01
Massa contaminante ao fim de 8 dias	1,85E-03

Fugacidade inicial no 9º dia, Pa	3,04E+02
Fugacidade, Pa	2,80E+02
Concentração no ar, mol/m ³	1,13E-01
Massa contaminante ao fim de 9 dias	1,67E-03
Fugacidade inicial no 10º dia, Pa	2,75E+02
Fugacidade, Pa	2,53E+02
Concentração no ar, mol/m ³	1,02E-01
Massa contaminante ao fim de 10 dias	1,51E-03
Fugacidade inicial no 11º dia, Pa	2,48E+02
Fugacidade, Pa	2,29E+02
Concentração no ar, mol/m ³	9,22E-02
Massa contaminante ao fim de 11 dias	1,36E-03
Fugacidade inicial no 12º dia, Pa	2,24E+02
Fugacidade, Pa	2,06E+02
Concentração no ar, mol/m ³	8,33E-02
Massa contaminante ao fim de 12 dias	1,23E-03
Fugacidade inicial no 13º dia, Pa	2,02E+02
Fugacidade, Pa	1,86E+02
Concentração no ar, mol/m ³	7,52E-02
Massa contaminante ao fim de 13 dias	1,11E-03
Fugacidade inicial no 14º dia, Pa	1,83E+02
Fugacidade, Pa	1,68E+02
Concentração no ar, mol/m ³	6,79E-02
Massa contaminante ao fim de 14 dias	1,00E-03
Fugacidade inicial no 15º dia, Pa	1,65E+02
Fugacidade, Pa	1,52E+02
Concentração no ar, mol/m ³	6,13E-02
Massa contaminante ao fim de 15 dias	9,03E-04
Fugacidade inicial no 16º dia, Pa	1,49E+02
Fugacidade, Pa	1,37E+02
Concentração no ar, mol/m ³	5,53E-02
Massa contaminante ao fim de 16 dias	8,16E-04

Ensaio de Bio-ventilação Inoculado - Calcário com Benzeno (BVCL_B)		Ensaio de Bio-ventilação Inoculado - Calcário com Tolueno (BVCL_T)	
Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	1,82E+03	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	9,32E+02
Fugacidade, Pa	1,36E+03	Fugacidade, Pa	6,06E+02
Concentração no ar, mol/m3	5,50E-01	Concentração no ar, mol/m3	2,45E-01
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,66E-03	Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	2,73E-03
Fugacidade Inicial 2º dia, Pa	1,30E+03	Fugacidade Inicial 2º dia, Pa	5,86E+02
Fugacidade, Pa	9,74E+02	Fugacidade, Pa	3,81E+02
Concentração no ar, mol/m3	3,93E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,54E-01
Massa contaminante ao fim de 2 dias	2,61E-03	Massa contaminante ao fim de 2 dias	1,71E-03
Fugacidade Inicial 3º dia, Pa	9,29E+02	Fugacidade Inicial 3º dia, Pa	3,68E+02
Fugacidade, Pa	6,95E+02	Fugacidade, Pa	2,39E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,81E-01	Concentração no ar, mol/m3	9,65E-02
Massa contaminante ao fim de 3 dias	1,87E-03	Massa contaminante ao fim de 3 dias	1,08E-03
Fugacidade Inicial 4º dia, Pa	6,64E+02	Fugacidade Inicial 4º dia, Pa	2,31E+02
Fugacidade, Pa	4,97E+02	Fugacidade, Pa	1,50E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,00E-01	Concentração no ar, mol/m3	6,07E-02
Massa contaminante ao fim de 4 dias	1,33E-03	Massa contaminante ao fim de 4 dias	6,76E-04
Fugacidade Inicial 5º dia, Pa	4,74E+02	Fugacidade Inicial 5º dia, Pa	1,45E+02
Fugacidade, Pa	3,55E+02	Fugacidade, Pa	9,45E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,43E-01	Concentração no ar, mol/m3	3,81E-02
Massa contaminante ao fim de 5 dias	9,51E-04	Massa contaminante ao fim de 5 dias	4,25E-04
Fugacidade Inicial 6º dia, Pa	3,39E+02	Fugacidade Inicial 6º dia, Pa	9,12E+01
Fugacidade, Pa	2,53E+02	Fugacidade, Pa	5,93E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,02E-01	Concentração no ar, mol/m3	2,39E-02
Massa contaminante ao fim de 6 dias	6,79E-04	Massa contaminante ao fim de 6 dias	2,67E-04
Fugacidade Inicial 7º dia, Pa	2,42E+02	Fugacidade Inicial 7º dia, Pa	5,73E+01
Fugacidade, Pa	1,81E+02	Fugacidade, Pa	3,73E+01
Concentração no ar, mol/m3	7,30E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,50E-02
Massa contaminante ao fim de 7 dias	4,85E-04	Massa contaminante ao fim de 7 dias	1,68E-04
Fugacidade Inicial 8º dia, Pa	1,73E+02	Fugacidade Inicial 8º dia, Pa	3,60E+01
Fugacidade, Pa	1,29E+02	Fugacidade, Pa	2,34E+01
Concentração no ar, mol/m3	5,21E-02	Concentração no ar, mol/m3	9,45E-03
Massa contaminante ao fim de 8 dias	3,47E-04	Massa contaminante ao fim de 8 dias	1,05E-04
Fugacidade Inicial 9º dia, Pa	1,23E+02	Fugacidade Inicial 9º dia, Pa	2,26E+01
Fugacidade, Pa	9,23E+01	Fugacidade, Pa	1,47E+01
Concentração no ar, mol/m3	3,72E-02	Concentração no ar, mol/m3	5,94E-03
Massa contaminante ao fim de 9 dias	2,47E-04	Massa contaminante ao fim de 9 dias	6,62E-05
Fugacidade Inicial 10º dia, Pa	8,81E+01	Fugacidade Inicial 10º dia, Pa	1,42E+01
Fugacidade, Pa	6,59E+01	Fugacidade, Pa	9,24E+00
Concentração no ar, mol/m3	2,66E-02	Concentração no ar, mol/m3	3,73E-03
Massa contaminante ao fim de 10 dias	1,77E-04	Massa contaminante ao fim de 10 dias	4,16E-05
Fugacidade Inicial 11º dia, Pa	6,29E+01		
Fugacidade, Pa	4,71E+01	Total de contaminante bio-degradado, mol	0,0041
Concentração no ar, mol/m3	1,90E-02		
Massa contaminante ao fim de 11 dias	1,26E-04		
Total de contaminante bio-degradado, mol	0,0044		

Ensaio de Bio-ventilação Inoculado - Calcário com Etilbenzeno (BVCL_E)		Ensaio de Bio-ventilação Inoculado - Calcário com Xileno (BVCL_X)	
Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	5,46E+02	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	3,81E+02
Fugacidade, Pa	2,49E+02	Fugacidade, Pa	2,05E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,01E-01	Concentração no ar, mol/m3	8,27E-02
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	1,59E-03	Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	1,95E-03
Fugacidade Inicial 2º dia, Pa	2,30E+02	Fugacidade Inicial 2º dia, Pa	1,97E+02
Fugacidade, Pa	1,05E+02	Fugacidade, Pa	1,06E+02
Concentração no ar, mol/m3	4,24E-02	Concentração no ar, mol/m3	4,27E-02
Massa contaminante ao fim de 2 dias	6,68E-04	Massa contaminante ao fim de 2 dias	1,01E-03
Fugacidade Inicial 3º dia, Pa	9,68E+01	Fugacidade Inicial 3º dia, Pa	1,02E+02
Fugacidade, Pa	4,42E+01	Fugacidade, Pa	5,47E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,78E-02	Concentração no ar, mol/m3	2,21E-02
Massa contaminante ao fim de 3 dias	2,81E-04	Massa contaminante ao fim de 3 dias	5,20E-04
Fugacidade Inicial 4º dia, Pa	4,08E+01	Fugacidade Inicial 4º dia, Pa	5,26E+01
Fugacidade, Pa	1,86E+01	Fugacidade, Pa	2,83E+01
Concentração no ar, mol/m3	7,51E-03	Concentração no ar, mol/m3	1,14E-02
Massa contaminante ao fim de 4 dias	1,18E-04	Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,69E-04
Fugacidade Inicial 5º dia, Pa	1,72E+01	Fugacidade Inicial 5º dia, Pa	2,72E+01
Fugacidade, Pa	7,84E+00	Fugacidade, Pa	1,46E+01
Concentração no ar, mol/m3	3,16E-03	Concentração no ar, mol/m3	5,90E-03
Massa contaminante ao fim de 5 dias	4,98E-05	Massa contaminante ao fim de 5 dias	1,39E-04
Fugacidade Inicial 6º dia, Pa	7,23E+00	Fugacidade Inicial 6º dia, Pa	1,40E+01
Fugacidade, Pa	3,30E+00	Fugacidade, Pa	7,55E+00
Concentração no ar, mol/m3	1,33E-03	Concentração no ar, mol/m3	3,05E-03
Massa contaminante ao fim de 6 dias	2,10E-05	Massa contaminante ao fim de 6 dias	7,17E-05
Fugacidade Inicial 7º dia, Pa	3,04E+00	Fugacidade Inicial 7º dia, Pa	7,26E+00
Fugacidade, Pa	1,39E+00	Fugacidade, Pa	3,90E+00
Concentração no ar, mol/m3	5,60E-04	Concentração no ar, mol/m3	1,57E-03
Massa contaminante ao fim de 7 dias	8,83E-06	Massa contaminante ao fim de 7 dias	3,71E-05
Fugacidade Inicial 8º dia, Pa	1,28E+00	Fugacidade Inicial 8º dia, Pa	3,75E+00
Fugacidade, Pa	5,85E-01	Fugacidade, Pa	2,02E+00
Concentração no ar, mol/m3	2,36E-04	Concentração no ar, mol/m3	8,14E-04
Massa contaminante ao fim de 8 dias	3,72E-06	Massa contaminante ao fim de 8 dias	1,92E-05
Fugacidade Inicial 9º dia, Pa	5,39E-01	Fugacidade Inicial 9º dia, Pa	1,94E+00
Fugacidade, Pa	2,46E-01	Fugacidade, Pa	1,04E+00
Concentração no ar, mol/m3	9,93E-05	Concentração no ar, mol/m3	4,20E-04
Massa contaminante ao fim de 9 dias	1,56E-06	Massa contaminante ao fim de 9 dias	9,90E-06
Fugacidade Inicial 10º dia, Pa	2,27E-01	Fugacidade Inicial 10º dia, Pa	1,00E+00
Fugacidade, Pa	1,04E-01	Fugacidade, Pa	5,39E-01
Concentração no ar, mol/m3	4,18E-05	Concentração no ar, mol/m3	2,17E-04
Massa contaminante ao fim de 10 dias	6,59E-07	Massa contaminante ao fim de 10 dias	5,11E-06
Fugacidade Inicial 11º dia, Pa	9,56E-02	Fugacidade Inicial 11º dia, Pa	5,17E-01
Fugacidade, Pa	4,36E-02	Fugacidade, Pa	2,78E-01
Concentração no ar, mol/m3	1,76E-05	Concentração no ar, mol/m3	1,12E-04
Massa contaminante ao fim de 11 dias	2,77E-07	Massa contaminante ao fim de 11 dias	2,64E-06
Total de contaminante bio-degradado, mol	0,0037	Fugacidade Inicial 12º dia, Pa	2,67E-01
		Fugacidade, Pa	1,44E-01
		Concentração no ar, mol/m3	5,80E-05
		Massa contaminante ao fim de 12 dias	1,37E-06
		Total de contaminante bio-degradado, mol	0,0037

Ensaio de Bio-ventilação Inoculado - Calcário com BTEoX (BVCL_BTEoX)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	6,89E+02	Fugacidade Inicial 9º dia, Pa	7,06E-03
Fugacidade, Pa	2,19E+02	Fugacidade, Pa	2,24E-03
Concentração no ar, mol/m3	8,83E-02	Concentração no ar, mol/m3	9,04E-07
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	9,95E-04	Massa contaminante ao fim de 9 dias	1,02E-08
Fugacidade Inicial 2º dia, Pa	1,64E+02	Fugacidade Inicial 10º dia, Pa	1,68E-03
Fugacidade, Pa	5,20E+01	Fugacidade, Pa	5,33E-04
Concentração no ar, mol/m3	2,10E-02	Concentração no ar, mol/m3	2,15E-07
Massa contaminante ao fim de 2 dias	2,37E-04	Massa contaminante ao fim de 10 dias	2,42E-09
Fugacidade Inicial 3º dia, Pa	3,90E+01	Fugacidade Inicial 11º dia, Pa	3,99E-04
Fugacidade, Pa	1,24E+01	Fugacidade, Pa	1,27E-04
Concentração no ar, mol/m3	4,99E-03	Concentração no ar, mol/m3	5,11E-08
Massa contaminante ao fim de 3 dias	5,63E-05	Massa contaminante ao fim de 11 dias	5,76E-10
Fugacidade Inicial 4º dia, Pa	9,27E+00	Fugacidade Inicial 12º dia, Pa	9,50E-05
Fugacidade, Pa	2,94E+00	Fugacidade, Pa	3,02E-05
Concentração no ar, mol/m3	1,19E-03	Concentração no ar, mol/m3	1,22E-08
Massa contaminante ao fim de 4 dias	1,34E-05	Massa contaminante ao fim de 12 dias	1,37E-10
Fugacidade Inicial 5º dia, Pa	2,21E+00	Fugacidade Inicial 13º dia, Pa	2,26E-05
Fugacidade, Pa	7,00E-01	Fugacidade, Pa	7,17E-06
Concentração no ar, mol/m3	2,83E-04	Concentração no ar, mol/m3	2,89E-09
Massa contaminante ao fim de 5 dias	3,18E-06	Massa contaminante ao fim de 13 dias	3,26E-11
Fugacidade Inicial 6º dia, Pa	5,25E-01	Fugacidade Inicial 14º dia, Pa	5,37E-06
Fugacidade, Pa	1,67E-01	Fugacidade, Pa	1,71E-06
Concentração no ar, mol/m3	6,72E-05	Concentração no ar, mol/m3	6,88E-10
Massa contaminante ao fim de 6 dias	7,57E-07	Massa contaminante ao fim de 14 dias	7,75E-12
Fugacidade Inicial 7º dia, Pa	1,25E-01	Fugacidade Inicial 15º dia, Pa	1,28E-06
Fugacidade, Pa	3,96E-02	Fugacidade, Pa	4,06E-07
Concentração no ar, mol/m3	1,60E-05	Concentração no ar, mol/m3	1,64E-10
Massa contaminante ao fim de 7 dias	1,80E-07	Massa contaminante ao fim de 15 dias	1,84E-12
Fugacidade Inicial 8º dia, Pa	2,97E-02	Fugacidade Inicial 16º dia, Pa	3,04E-07
Fugacidade, Pa	9,42E-03	Fugacidade, Pa	9,65E-08
Concentração no ar, mol/m3	3,80E-06	Concentração no ar, mol/m3	3,89E-11
Massa contaminante ao fim de 8 dias	4,28E-08	Massa contaminante ao fim de 16 dias	4,39E-13
		Total de contaminante bio-degradado, mol	0,0041

**Ensaio de Bio-ventilação - Granito com Benzeno
(BVbSR_B, BVSR_B e BVSR2_B)**

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura interna da coluna, m	5,00E-01	Nome	Benzeno
Altura do solo, m	2,20E-01	Fórmula	C ₆ H ₆
Volume de ar, L	2,20E+00	Massa Molecular	7,81E+01
		Constante Henry adimensional	2,33E-01
Composição do solo:		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	5,76E+02
Humidade volumétrica	2,40E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	6,76E+01
Porosidade volumétrica total	6,60E-01	Coeficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	3,79E+01
Fracção vazios com ar	4,20E-01	Coeficiente partilha solo-água, L/kg	2,68E-01
Fracção Matéria Orgânica	7,07E-03	Coeficiente partilha MM-água, L/kg	1,69E-01
Fracção Matéria Mineral	3,33E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	3,96E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	2,50E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,73E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	6,57E-02
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	7,86E-04
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	1,31E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,68E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	1,18E-06
Volumes:		Água, mol/Pa	7,19E-07
Solo Total, m ³	1,73E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	8,02E-07
Água, m ³	4,15E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	4,52E-07
Ar, m ³	7,26E-04	TOTAL	3,15E-06
Matéria Orgânica, m ³	1,22E-05		
Matéria Mineral, m ³	5,75E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa:	1,62E+03
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,14E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	4,00E-04	Ar, mol/m ³	6,55E-01
Quantidade total contaminante, mol	5,12E-03	Água, mol/m ³	2,82E+00
Concentração média, mg/kg	2,03E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,07E+02
Concentração média, mmol/kg	2,60E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	1,28E+00
		Massas em cada compartimento:	
		Ar, mol	1,92E-03
		Água, mol	1,17E-03
		Matéria orgânica, mol	1,30E-03
		Matéria mineral, mol	7,34E-04
		TOTAL	5,12E-03
	BVbSR_B	BVSR_B	BVSR2_B
Semi-vida, h	2,00E+02	9,60E+01	1,20E+02
Constante cinética,, h ⁻¹	3,47E-03	7,22E-03	5,78E-03
Dr, mol/(Pa,h)	7,86E-09	1,64E-08	1,31E-08
Constante Cinética Global, h ⁻¹	2,49E-03	5,19E-03	4,15E-03
Vol. ar extraído diariamente, m ³		3,00E-04	

**Ensaio de Bio-ventilação - Granito com Tolueno
(BVbSR_T, BVSR_T e BVSR2_T)**

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura interna da coluna, m	5,00E-01	Nome	Tolueno
Altura do solo, m	2,20E-01	Fórmula	C ₇ H ₈
Volume de ar, L	2,20E+00	Massa Molecular	9,22E+01
		Constante Henry adimensional	2,76E-01
		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	6,83E+02
Composição do solo:		Coeficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	2,04E+02
Humidade volumétrica	2,40E-01	Coeficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	1,14E+02
Porosidade volumétrica total	6,60E-01	Coeficiente partilha solo-água, L/kg	8,09E-01
Fracção vazios com ar	4,20E-01	Coeficiente partilha MM-água, L/kg	5,11E-01
Fracção Matéria Orgânica	7,07E-03		
Fracção Matéria Mineral	3,33E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	3,96E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	2,50E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,46E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	1,67E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	2,00E-03
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	2,37E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,68E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	1,18E-06
Volumes:		Água, mol/Pa	6,07E-07
Solo Total, m ³	1,73E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	2,04E-06
Água, m ³	4,15E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	1,15E-06
Ar, m ³	7,26E-04	TOTAL	4,98E-06
Matéria Orgânica, m ³	1,22E-05		
Matéria Mineral, m ³	5,75E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa:	8,71E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,14E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	4,00E-04	Ar, mol/m ³	3,51E-01
Quantidade total contaminante, mol	4,34E-03	Água, mol/m ³	1,27E+00
Concentração média, mg/kg	2,03E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,46E+02
Concentração média, mmol/kg	2,20E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	1,74E+00
		Massas em cada compartimento:	
		Ar, mol	1,03E-03
		Água, mol	5,29E-04
		Matéria orgânica, mol	1,78E-03
		Matéria mineral, mol	1,00E-03
		TOTAL	4,34E-03
	BVbSR_T	BVSR_T	BVSR2_T
Semi-vida, h	3,00E+02	7,20E+01	1,20E+02
Constante cinética,, h ⁻¹	2,31E-03	9,63E-03	5,78E-03
Dr, mol/(Pa,h)	9,46E-09	3,94E-08	2,37E-08
Constante Cinética Global, h ⁻¹	1,90E-03	7,91E-03	4,75E-03
Vol. ar extraído diariamente, m ³		3,00E-04	

**Ensaio de Bio-ventilação - Granito com Etilbenzeno
(BVbSR_E, BVSR_E e BVSR2_E)**

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura interna da coluna, m	5,00E-01	Nome	Etilbenzeno
Altura do solo, m	2,20E-01	Fórmula	C ₈ H ₁₀
Volume de ar, L	2,20E+00	Massa Molecular	1,06E+02
Composição do solo:		Constante Henry adimensional	3,48E-01
		Constante Henry, Pa,m ³ /mol	8,62E+02
		Coefficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	4,47E+02
		Coefficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	2,50E+02
		Coefficiente partilha solo-água, L/kg	1,77E+00
Humidade volumétrica	2,40E-01	Coefficiente partilha MM-água, L/kg	1,12E+00
Porosidade volumétrica total	6,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção vazios com ar	4,20E-01	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção Matéria Orgânica	7,07E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,16E-03
Fracção Matéria Mineral	3,33E-01	Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	2,90E-01
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	3,47E-03
Fracção Carbono Orgânico Solo	3,96E-03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	3,66E-03
Fracção de argila considerada	2,50E-03	Produtos VZ:	
Densidades:		Ar, mol/Pa	1,18E-06
AR, kg/m ³	1,20E+00	Água, mol/Pa	4,81E-07
Água, kg/m ³	1,00E+03	Matéria Orgânica, mol/Pa	3,55E-06
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03	Matéria Mineral, mol/Pa	2,00E-06
Matéria Mineral, kg/m ³	2,68E+03	TOTAL	7,21E-06
Volumes:		Fugacidade inicial equilíbrio, Pa:	
Solo Total, m ³	1,73E-03		5,23E+02
Água, m ³	4,15E-04	Concentrações:	
Ar, m ³	7,26E-04	Ar, mol/m ³	2,11E-01
Matéria Orgânica, m ³	1,22E-05	Água, mol/m ³	6,07E-01
Matéria Mineral, m ³	5,75E-04	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,52E+02
		Matéria Mineral, mol/m ³	1,82E+00
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,14E+03	Massas em cada compartimento:	
Quantidade total contaminante, kg	4,00E-04	Ar, mol	6,17E-04
Quantidade total contaminante, mol	3,77E-03	Água, mol	2,52E-04
Concentração média, mg/kg	2,03E+02	Matéria orgânica, mol	1,85E-03
Concentração média, mmol/kg	1,91E+00	Matéria mineral, mol	1,04E-03
		TOTAL	3,77E-03
		BVbSR_E	BVSR_E
Semi-vida, h	4,00E+02	1,08E+02	1,20E+02
Constante cinética,, h ⁻¹	1,73E-03	6,42E-03	5,78E-03
Dr, mol/(Pa,h)	1,09E-08	4,05E-08	3,65E-08
Constante Cinética Global, h ⁻¹	1,52E-03	5,63E-03	5,07E-03
Vol. ar extraído diariamente, m ³		3,00E-04	

**Ensaio de Bio-ventilação - Granito com Xileno
(BVbSR_X, BVSR_X e BVSR2_X)**

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura interna da coluna, m	5,00E-01	Nome	Xileno
Altura do solo, m	2,20E-01	Fórmula	C ₈ H ₁₀
Volume de ar, L	2,20E+00	Massa Molecular	1,06E+02
		Constante Henry adimensional	2,23E-01
Composição do solo:		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	5,76E+02
Humidade volumétrica	2,40E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	4,57E+02
Porosidade volumétrica total	6,60E-01	Coeficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	2,56E+02
Fracção vazios com ar	4,20E-01	Coeficiente partilha solo-água, L/kg	1,81E+00
Fracção Matéria Orgânica	7,07E-03	Coeficiente partilha MM-água, L/kg	1,14E+00
Fracção Matéria Mineral	3,33E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	3,96E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	2,50E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,73E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	4,44E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	5,31E-03
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	5,50E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,68E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	1,18E-06
Volumes:		Água, mol/Pa	7,19E-07
Solo Total, m ³	1,73E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	5,43E-06
Água, m ³	4,15E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	3,06E-06
Ar, m ³	7,26E-04	TOTAL	1,04E-05
Matéria Orgânica, m ³	1,22E-05		
Matéria Mineral, m ³	5,75E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa:	3,63E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,14E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	4,00E-04	Ar, mol/m ³	1,46E-01
Quantidade total contaminante, mol	3,77E-03	Água, mol/m ³	6,30E-01
Concentração média, mg/kg	2,03E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,61E+02
Concentração média, mmol/kg	1,91E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	1,93E+00
		Massas em cada compartimento:	
		Ar, mol	4,28E-04
		Água, mol	2,61E-04
		Matéria orgânica, mol	1,97E-03
		Matéria mineral, mol	1,11E-03
		TOTAL	3,77E-03
	BVbSR_X	BVSR_X	BVSR2_X
Semi-vida, h	6,00E+02	1,70E+02	8,40E+01
Constante cinética,, h ⁻¹	1,16E-03	4,08E-03	8,25E-03
Dr, mol/(Pa,h)	1,10E-08	3,87E-08	7,84E-08
Constante Cinética Global, h ⁻¹	1,06E-03	3,73E-03	7,55E-03
Vol. ar extraído diariamente, m ³		3,00E-04	

**Ensaio de Bio-ventilação - Granito com BTEoX
(BVbSR_BTEoX, BVSR_BTEoX e BVSR2_BTEoX)**

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura interna da coluna, m	5,00E-01	Nome	BTEoX
Altura do solo, m	2,20E-01	Fórmula	
Volume de ar, L	2,20E+00	Massa Molecular	9,57E+01
		Constante Henry adimensional	2,65E-01
Composição do solo:		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	6,62E+02
Humidade volumétrica	2,40E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, Kco, L/kg	2,86E+02
Porosidade volumétrica total	6,60E-01	Coeficiente partilha MO, Kmo, L/kg	1,60E+02
Fracção vazios com ar	4,20E-01	Coeficiente partilha solo-água, L/kg	1,13E+00
Fracção Matéria Orgânica	7,07E-03	Coeficiente partilha MM-água, L/kg	7,16E-01
Fracção Matéria Mineral	3,33E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	3,96E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	2,50E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,51E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	2,42E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	2,90E-03
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	3,21E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,68E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	1,18E-06
Volumes:		Água, mol/Pa	6,27E-07
Solo Total, m ³	1,73E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	2,96E-06
Água, m ³	4,15E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	1,67E-06
Ar, m ³	7,26E-04	TOTAL	6,43E-06
Matéria Orgânica, m ³	1,22E-05		
Matéria Mineral, m ³	5,75E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa:	6,50E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,14E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	4,00E-04	Ar, mol/m ³	2,62E-01
Quantidade total contaminante, mol	4,18E-03	Água, mol/m ³	9,82E-01
Concentração média, mg/kg	2,03E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,57E+02
Concentração média, mmol/kg	2,12E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	1,88E+00
		Massas em cada compartimento:	
		Ar, mol	7,67E-04
		Água, mol	4,07E-04
		Matéria orgânica, mol	1,92E-03
		Matéria mineral, mol	1,08E-03
		TOTAL	4,18E-03
	BVbSR_BTEoX	BVSR_BTEoX	
Semi-vida, h	3,50E+02	7,20E+01	
Constante cinética,, h ⁻¹	1,98E-03	9,63E-03	
Dr, mol/(Pa,h)	1,10E-08	5,34E-08	
Constante Cinética Global, h ⁻¹	1,71E-03	8,30E-03	
Vol. ar extraído diariamente, m ³		3,00E-04	

Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado - Granito com Benzeno (BVbSR_B)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	1,62E+03	Fugacidade inicial no 10º dia, Pa	6,66E+02
Fugacidade, Pa	1,53E+03	Fugacidade, Pa	6,28E+02
Concentração no ar, mol/m3	6,17E-01	Concentração no ar, mol/m3	2,53E-01
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	4,64E-03	Massa contaminante ao fim de 10 dias	1,90E-03
Fugacidade inicial no 2º dia, Pa	1,47E+03	Fugacidade inicial no 11º dia, Pa	6,04E+02
Fugacidade, Pa	1,39E+03	Fugacidade, Pa	5,69E+02
Concentração no ar, mol/m3	5,59E-01	Concentração no ar, mol/m3	2,29E-01
Massa contaminante ao fim de 2 dias	4,20E-03	Massa contaminante ao fim de 11 dias	1,72E-03
Fugacidade inicial no 3º dia, Pa	1,33E+03	Fugacidade inicial no 12º dia, Pa	5,47E+02
Fugacidade, Pa	1,25E+03	Fugacidade, Pa	5,15E+02
Concentração no ar, mol/m3	5,06E-01	Concentração no ar, mol/m3	2,08E-01
Massa contaminante ao fim de 3 dias	3,81E-03	Massa contaminante ao fim de 12 dias	1,56E-03
Fugacidade inicial no 4º dia, Pa	1,21E+03	Fugacidade inicial no 13º dia, Pa	4,95E+02
Fugacidade, Pa	1,14E+03	Fugacidade, Pa	4,67E+02
Concentração no ar, mol/m3	4,59E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,88E-01
Massa contaminante ao fim de 4 dias	3,45E-03	Massa contaminante ao fim de 13 dias	1,42E-03
Fugacidade inicial no 5º dia, Pa	1,09E+03	Fugacidade inicial no 14º dia, Pa	4,49E+02
Fugacidade, Pa	1,03E+03	Fugacidade, Pa	4,23E+02
Concentração no ar, mol/m3	4,15E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,70E-01
Massa contaminante ao fim de 5 dias	3,12E-03	Massa contaminante ao fim de 14 dias	1,28E-03
Fugacidade inicial no 6º dia, Pa	9,90E+02	Fugacidade inicial no 15º dia, Pa	4,06E+02
Fugacidade, Pa	9,33E+02	Fugacidade, Pa	3,83E+02
Concentração no ar, mol/m3	3,76E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,54E-01
Massa contaminante ao fim de 6 dias	2,83E-03	Massa contaminante ao fim de 15 dias	1,16E-03
Fugacidade inicial no 7º dia, Pa	8,97E+02	Fugacidade inicial no 16º dia, Pa	3,68E+02
Fugacidade, Pa	8,45E+02	Fugacidade, Pa	3,47E+02
Concentração no ar, mol/m3	3,41E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,40E-01
Massa contaminante ao fim de 7 dias	2,56E-03	Massa contaminante ao fim de 16 dias	1,05E-03
Fugacidade inicial no 8º dia, Pa	8,12E+02	Fugacidade inicial no 17º dia, Pa	3,33E+02
Fugacidade, Pa	7,65E+02	Fugacidade após bombagem, Pa	3,14E+02
Concentração no ar, mol/m3	3,09E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,27E-01
Massa contaminante ao fim de 8 dias	2,32E-03	Massa contaminante ao fim de 17 dias	9,53E-04
Fugacidade inicial no 9º dia, Pa	7,36E+02	Fugacidade inicial no 18º dia, Pa	3,02E+02
Fugacidade, Pa	6,93E+02	Fugacidade após bombagem, Pa	2,85E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,80E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,15E-01
Massa contaminante ao fim de 9 dias	2,10E-03	Massa contaminante ao fim de 18 dias	8,63E-04

Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado - Granito com Tolueno (BVbSR_T)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	8,71E+02	Fugacidade inicial no 9º dia, Pa	4,97E+02
Fugacidade, Pa	8,32E+02	Fugacidade, Pa	4,75E+02
Concentração no ar, mol/m3	3,36E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,92E-01
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	4,05E-03	Massa contaminante ao fim de 9 dias	2,31E-03
Fugacidade inicial no 2º dia, Pa	8,12E+02	Fugacidade inicial no 10º dia, Pa	4,63E+02
Fugacidade, Pa	7,76E+02	Fugacidade, Pa	4,43E+02
Concentração no ar, mol/m3	3,13E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,79E-01
Massa contaminante ao fim de 2 dias	3,77E-03	Massa contaminante ao fim de 10 dias	2,15E-03
Fugacidade inicial no 3º dia, Pa	7,57E+02	Fugacidade inicial no 11º dia, Pa	4,32E+02
Fugacidade, Pa	7,23E+02	Fugacidade, Pa	4,13E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,92E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,66E-01
Massa contaminante ao fim de 3 dias	3,52E-03	Massa contaminante ao fim de 11 dias	2,01E-03
Fugacidade inicial no 4º dia, Pa	7,06E+02	Fugacidade inicial no 12º dia, Pa	4,03E+02
Fugacidade, Pa	6,74E+02	Fugacidade, Pa	3,85E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,72E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,55E-01
Massa contaminante ao fim de 4 dias	3,28E-03	Massa contaminante ao fim de 12 dias	1,87E-03
Fugacidade inicial no 5º dia, Pa	6,58E+02	Fugacidade inicial no 13º dia, Pa	3,75E+02
Fugacidade, Pa	6,29E+02	Fugacidade, Pa	3,59E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,54E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,45E-01
Massa contaminante ao fim de 5 dias	3,06E-03	Massa contaminante ao fim de 13 dias	1,74E-03
Fugacidade inicial no 6º dia, Pa	6,13E+02	Fugacidade inicial no 14º dia, Pa	3,50E+02
Fugacidade, Pa	5,86E+02	Fugacidade, Pa	3,34E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,36E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,35E-01
Massa contaminante ao fim de 6 dias	2,85E-03	Massa contaminante ao fim de 14 dias	1,63E-03
Fugacidade inicial no 7º dia, Pa	5,72E+02	Fugacidade inicial no 15º dia, Pa	3,26E+02
Fugacidade, Pa	5,46E+02	Fugacidade, Pa	3,12E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,20E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,26E-01
Massa contaminante ao fim de 7 dias	2,66E-03	Massa contaminante ao fim de 15 dias	1,52E-03
Fugacidade inicial no 8º dia, Pa	5,33E+02		
Fugacidade, Pa	5,09E+02		
Concentração no ar, mol/m3	2,05E-01		
Massa contaminante ao fim de 8 dias	2,48E-03		

Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado - Granito com Etilbenzeno (BVbSR_E)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	5,23E+02	Fugacidade inicial no 9º dia, Pa	3,41E+02
Fugacidade, Pa	5,04E+02	Fugacidade, Pa	3,29E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,03E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,33E-01
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,57E-03	Massa contaminante ao fim de 9 dias	2,33E-03
Fugacidade inicial no 2º dia, Pa	4,96E+02	Fugacidade inicial no 10º dia, Pa	3,23E+02
Fugacidade, Pa	4,78E+02	Fugacidade, Pa	3,12E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,93E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,26E-01
Massa contaminante ao fim de 2 dias	3,39E-03	Massa contaminante ao fim de 10 dias	2,21E-03
Fugacidade inicial no 3º dia, Pa	4,70E+02	Fugacidade inicial no 11º dia, Pa	3,06E+02
Fugacidade, Pa	4,53E+02	Fugacidade, Pa	2,96E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,83E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,19E-01
Massa contaminante ao fim de 3 dias	3,21E-03	Massa contaminante ao fim de 11 dias	2,09E-03
Fugacidade inicial no 4º dia, Pa	4,45E+02	Fugacidade inicial no 12º dia, Pa	2,91E+02
Fugacidade, Pa	4,29E+02	Fugacidade, Pa	2,80E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,73E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,13E-01
Massa contaminante ao fim de 4 dias	3,04E-03	Massa contaminante ao fim de 12 dias	1,98E-03
Fugacidade inicial no 5º dia, Pa	4,22E+02	Fugacidade inicial no 13º dia, Pa	2,75E+02
Fugacidade, Pa	4,07E+02	Fugacidade, Pa	2,66E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,64E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,07E-01
Massa contaminante ao fim de 5 dias	2,88E-03	Massa contaminante ao fim de 13 dias	1,88E-03
Fugacidade inicial no 6º dia, Pa	4,00E+02	Fugacidade inicial no 14º dia, Pa	2,61E+02
Fugacidade, Pa	3,86E+02	Fugacidade, Pa	2,52E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,56E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,02E-01
Massa contaminante ao fim de 6 dias	2,73E-03	Massa contaminante ao fim de 14 dias	1,78E-03
Fugacidade inicial no 7º dia, Pa	3,79E+02	Fugacidade inicial no 15º dia, Pa	2,48E+02
Fugacidade, Pa	3,66E+02	Fugacidade, Pa	2,39E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,48E-01	Concentração no ar, mol/m3	9,63E-02
Massa contaminante ao fim de 7 dias	2,59E-03	Massa contaminante ao fim de 15 dias	1,69E-03
Fugacidade inicial no 8º dia, Pa	3,60E+02		
Fugacidade, Pa	3,47E+02		
Concentração no ar, mol/m3	1,40E-01		
Massa contaminante ao fim de 8 dias	2,46E-03		

Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado - Granito com Xileno (BVbSR_X)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	3,63E+02	Fugacidade inicial no 13º dia, Pa	2,33E+02
Fugacidade, Pa	3,54E+02	Fugacidade, Pa	2,27E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,43E-01	Concentração no ar, mol/m3	9,15E-02
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,63E-03	Massa contaminante ao fim de 13 dias	2,33E-03
Fugacidade inicial no 2º dia, Pa	3,50E+02	Fugacidade inicial no 14º dia, Pa	2,24E+02
Fugacidade, Pa	3,41E+02	Fugacidade, Pa	2,18E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,38E-01	Concentração no ar, mol/m3	8,81E-02
Massa contaminante ao fim de 2 dias	3,50E-03	Massa contaminante ao fim de 14 dias	2,24E-03
Fugacidade inicial no 3º dia, Pa	3,37E+02	Fugacidade inicial no 15º dia, Pa	2,16E+02
Fugacidade, Pa	3,28E+02	Fugacidade, Pa	2,10E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,33E-01	Concentração no ar, mol/m3	8,49E-02
Massa contaminante ao fim de 3 dias	3,37E-03	Massa contaminante ao fim de 15 dias	2,16E-03
Fugacidade inicial no 4º dia, Pa	3,25E+02	Fugacidade inicial no 16º dia, Pa	2,08E+02
Fugacidade, Pa	3,17E+02	Fugacidade, Pa	2,03E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,28E-01	Concentração no ar, mol/m3	8,18E-02
Massa contaminante ao fim de 4 dias	3,25E-03	Massa contaminante ao fim de 16 dias	2,08E-03
Fugacidade inicial no 5º dia, Pa	3,13E+02	Fugacidade inicial no 17º dia, Pa	2,00E+02
Fugacidade, Pa	3,05E+02	Fugacidade após bombagem, Pa	1,95E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,23E-01	Concentração no ar, mol/m3	7,88E-02
Massa contaminante ao fim de 5 dias	3,13E-03	Massa contaminante ao fim de 17 dias	2,01E-03
Fugacidade inicial no 6º dia, Pa	3,01E+02	Fugacidade inicial no 18º dia, Pa	1,93E+02
Fugacidade, Pa	2,94E+02	Fugacidade após bombagem, Pa	1,88E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,19E-01	Concentração no ar, mol/m3	7,60E-02
Massa contaminante ao fim de 6 dias	3,02E-03	Massa contaminante ao fim de 18 dias	1,93E-03
Fugacidade inicial no 7º dia, Pa	2,90E+02	Fugacidade inicial no 19º dia, Pa	1,86E+02
Fugacidade, Pa	2,83E+02	Fugacidade, Pa	1,81E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,14E-01	Concentração no ar, mol/m3	7,32E-02
Massa contaminante ao fim de 7 dias	2,91E-03	Massa contaminante ao fim de 19 dias	1,86E-03
Fugacidade inicial no 8º dia, Pa	2,80E+02	Fugacidade inicial no 20º dia, Pa	1,79E+02
Fugacidade, Pa	2,73E+02	Fugacidade, Pa	1,75E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,10E-01	Concentração no ar, mol/m3	7,05E-02
Massa contaminante ao fim de 8 dias	2,80E-03	Massa contaminante ao fim de 20 dias	1,79E-03
Fugacidade inicial no 9º dia, Pa	2,70E+02	Fugacidade inicial no 21º dia, Pa	1,73E+02
Fugacidade, Pa	2,63E+02	Fugacidade, Pa	1,69E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,06E-01	Concentração no ar, mol/m3	6,80E-02
Massa contaminante ao fim de 9 dias	2,70E-03	Massa contaminante ao fim de 21 dias	1,73E-03
Fugacidade inicial no 10º dia, Pa	2,60E+02	Fugacidade inicial no 22º dia, Pa	1,67E+02
Fugacidade, Pa	2,53E+02	Fugacidade após bombagem, Pa	1,62E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,02E-01	Concentração no ar, mol/m3	6,55E-02
Massa contaminante ao fim de 10 dias	2,60E-03	Massa contaminante ao fim de 22 dias	1,67E-03
Fugacidade inicial no 11º dia, Pa	2,50E+02	Fugacidade inicial no 23º dia, Pa	1,60E+02
Fugacidade, Pa	2,44E+02	Fugacidade após bombagem, Pa	1,56E+02
Concentração no ar, mol/m3	9,85E-02	Concentração no ar, mol/m3	6,31E-02
Massa contaminante ao fim de 11 dias	2,51E-03	Massa contaminante ao fim de 23 dias	1,61E-03
Fugacidade inicial no 12º dia, Pa	2,41E+02	Fugacidade inicial no 24º dia, Pa	1,55E+02
Fugacidade, Pa	2,35E+02	Fugacidade, Pa	1,51E+02
Concentração no ar, mol/m3	9,49E-02	Concentração no ar, mol/m3	6,08E-02
Massa contaminante ao fim de 12 dias	2,41E-03	Massa contaminante ao fim de 24 dias	1,55E-03

Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado - Granito com Xileno (BVbSR_X), continuação

Fugacidade inicial no 25º dia, Pa	1,49E+02	Fugacidade inicial no 27º dia, Pa	1,38E+02
Fugacidade após bombagem, Pa	1,45E+02	Fugacidade, Pa	1,35E+02
Concentração no ar, mol/m3	5,86E-02	Concentração no ar, mol/m3	5,44E-02
Massa contaminante ao fim de 25 dias	1,49E-03	Massa contaminante ao fim de 27 dias	1,38E-03
Fugacidade inicial no 26º dia, Pa	1,44E+02		
Fugacidade após bombagem, Pa	1,40E+02		
Concentração no ar, mol/m3	5,65E-02		
Massa contaminante ao fim de 26 dias	1,44E-03		

Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado - Granito com BTEoX (BVbGR_BTEoX)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	6,50E+02	Fugacidade inicial no 8º dia, Pa	4,27E+02
Fugacidade, Pa	623,82	Fugacidade, Pa	4,10E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,52E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,65E-01
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,94E-03	Massa contaminante ao fim de 8 dias	2,59E-03
Fugacidade inicial no 2º dia, Pa	6,12E+02	Fugacidade inicial no 9º dia, Pa	4,02E+02
Fugacidade, Pa	5,88E+02	Fugacidade, Pa	3,86E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,37E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,56E-01
Massa contaminante ao fim de 2 dias	3,71E-03	Massa contaminante ao fim de 9 dias	2,44E-03
Fugacidade inicial no 3º dia, Pa	5,76E+02	Fugacidade inicial no 10º dia, Pa	3,79E+02
Fugacidade, Pa	5,53E+02	Fugacidade, Pa	3,64E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,23E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,47E-01
Massa contaminante ao fim de 3 dias	3,49E-03	Massa contaminante ao fim de 10 dias	2,30E-03
Fugacidade inicial no 4º dia, Pa	5,43E+02	Fugacidade inicial no 11º dia, Pa	3,57E+02
Fugacidade, Pa	5,21E+02	Fugacidade, Pa	3,42E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,10E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,38E-01
Massa contaminante ao fim de 4 dias	3,29E-03	Massa contaminante ao fim de 11 dias	2,16E-03
Fugacidade inicial no 5º dia, Pa	5,11E+02	Fugacidade inicial no 12º dia, Pa	3,36E+02
Fugacidade, Pa	4,91E+02	Fugacidade, Pa	3,23E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,98E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,30E-01
Massa contaminante ao fim de 5 dias	3,10E-03	Massa contaminante ao fim de 12 dias	2,04E-03
Fugacidade inicial no 6º dia, Pa	4,82E+02	Fugacidade inicial no 13º dia, Pa	3,16E+02
Fugacidade, Pa	4,62E+02	Fugacidade após bombagem, Pa	3,04E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,86E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,23E-01
Massa contaminante ao fim de 6 dias	2,92E-03	Massa contaminante ao fim de 13 dias	1,92E-03
Fugacidade inicial no 7º dia, Pa	4,54E+02	Fugacidade inicial no 14º dia, Pa	2,98E+02
Fugacidade, Pa	4,35E+02	Fugacidade, Pa	2,86E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,76E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,15E-01
Massa contaminante ao fim de 7 dias	2,75E-03	Massa contaminante ao fim de 14 dias	1,81E-03

Ensaio 1 de Bio-ventilação Inoculado - Granito com Benzeno (BVSr_B)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	1,62E+03	Fugacidade Inicial 11° dia, Pa	3,15E+02
Fugacidade, Pa	1,43E+03	Fugacidade, Pa	2,78E+02
Concentração no ar, mol/m3	5,78E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,12E-01
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	4,35E-03	Massa contaminante ao fim de 11 dias	8,44E-04
Fugacidade Inicial 2° dia, Pa	1,38E+03	Fugacidade Inicial 12° dia, Pa	2,68E+02
Fugacidade, Pa	1,22E+03	Fugacidade, Pa	2,36E+02
Concentração no ar, mol/m3	4,91E-01	Concentração no ar, mol/m3	9,54E-02
Massa contaminante ao fim de 2 dias	3,69E-03	Massa contaminante ao fim de 12 dias	7,17E-04
Fugacidade Inicial 3° dia, Pa	1,17E+03	Fugacidade Inicial 13° dia, Pa	2,27E+02
Fugacidade, Pa	1,03E+03	Fugacidade, Pa	2,01E+02
Concentração no ar, mol/m3	4,17E-01	Concentração no ar, mol/m3	8,09E-02
Massa contaminante ao fim de 3 dias	3,13E-03	Massa contaminante ao fim de 13 dias	6,08E-04
Fugacidade Inicial 4° dia, Pa	9,93E+02	Fugacidade Inicial 14° dia, Pa	1,93E+02
Fugacidade, Pa	8,77E+02	Fugacidade, Pa	1,70E+02
Concentração no ar, mol/m3	3,54E-01	Concentração no ar, mol/m3	6,87E-02
Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,66E-03	Massa contaminante ao fim de 14 dias	5,16E-04
Fugacidade Inicial 5° dia, Pa	8,43E+02	Fugacidade Inicial 15° dia, Pa	1,64E+02
Fugacidade, Pa	7,44E+02	Fugacidade, Pa	1,45E+02
Concentração no ar, mol/m3	3,00E-01	Concentração no ar, mol/m3	5,83E-02
Massa contaminante ao fim de 5 dias	2,26E-03	Massa contaminante ao fim de 15 dias	4,38E-04
Fugacidade Inicial 6° dia, Pa	7,16E+02	Fugacidade Inicial 16° dia, Pa	1,39E+02
Fugacidade, Pa	6,32E+02	Fugacidade, Pa	1,23E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,55E-01	Concentração no ar, mol/m3	4,95E-02
Massa contaminante ao fim de 6 dias	1,92E-03	Massa contaminante ao fim de 16 dias	3,72E-04
Fugacidade Inicial 7° dia, Pa	6,07E+02	Fugacidade Inicial 17° dia, Pa	1,18E+02
Fugacidade, Pa	5,36E+02	Fugacidade, Pa	1,04E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,16E-01	Concentração no ar, mol/m3	4,20E-02
Massa contaminante ao fim de 7 dias	1,63E-03	Massa contaminante ao fim de 17 dias	3,16E-04
Fugacidade Inicial 8° dia, Pa	5,16E+02	Fugacidade Inicial 18° dia, Pa	1,00E+02
Fugacidade, Pa	4,55E+02	Fugacidade, Pa	8,84E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,84E-01	Concentração no ar, mol/m3	3,57E-02
Massa contaminante ao fim de 8 dias	1,38E-03	Massa contaminante ao fim de 18 dias	2,68E-04
Fugacidade Inicial 9° dia, Pa	4,38E+02		
Fugacidade, Pa	3,86E+02	Total de contaminante bio-degradado, mol	3,76E-03
Concentração no ar, mol/m3	1,56E-01		
Massa contaminante ao fim de 9 dias	1,17E-03		
Fugacidade Inicial 10° dia, Pa	3,72E+02		
Fugacidade, Pa	3,28E+02		
Concentração no ar, mol/m3	1,32E-01		
Massa contaminante ao fim de 10 dias	9,95E-04		

Ensaio 2 de Bio-ventilação Inoculado - Granito com Benzeno (BVSR2_B)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	1,62E+03	Fugacidade Inicial 12° dia, Pa	3,52E+02
Fugacidade, Pa	1,47E+03	Fugacidade, Pa	3,19E+02
Concentração no ar, mol/m3	5,93E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,29E-01
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	4,46E-03	Massa contaminante ao fim de 12 dias	9,68E-04
Fugacidade Inicial 2° dia, Pa	1,41E+03	Fugacidade Inicial 13° dia, Pa	3,07E+02
Fugacidade, Pa	1,28E+03	Fugacidade, Pa	2,78E+02
Concentração no ar, mol/m3	5,16E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,12E-01
Massa contaminante ao fim de 2 dias	3,88E-03	Massa contaminante ao fim de 13 dias	8,42E-04
Fugacidade Inicial 3° dia, Pa	1,23E+03	Fugacidade Inicial 14° dia, Pa	2,67E+02
Fugacidade, Pa	1,11E+03	Fugacidade, Pa	2,42E+02
Concentração no ar, mol/m3	4,49E-01	Concentração no ar, mol/m3	9,75E-02
Massa contaminante ao fim de 3 dias	3,38E-03	Massa contaminante ao fim de 14 dias	7,33E-04
Fugacidade Inicial 4° dia, Pa	1,07E+03	Fugacidade Inicial 15° dia, Pa	2,32E+02
Fugacidade, Pa	9,69E+02	Fugacidade, Pa	2,10E+02
Concentração no ar, mol/m3	3,91E-01	Concentração no ar, mol/m3	8,49E-02
Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,94E-03	Massa contaminante ao fim de 15 dias	6,38E-04
Fugacidade Inicial 5° dia, Pa	9,32E+02	Fugacidade Inicial 16° dia, Pa	2,02E+02
Fugacidade, Pa	8,43E+02	Fugacidade, Pa	1,83E+02
Concentração no ar, mol/m3	3,40E-01	Concentração no ar, mol/m3	7,39E-02
Massa contaminante ao fim de 5 dias	2,56E-03	Massa contaminante ao fim de 16 dias	5,55E-04
Fugacidade Inicial 6° dia, Pa	8,11E+02	Fugacidade Inicial 17° dia, Pa	1,76E+02
Fugacidade, Pa	7,34E+02	Fugacidade, Pa	1,59E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,96E-01	Concentração no ar, mol/m3	6,43E-02
Massa contaminante ao fim de 6 dias	2,23E-03	Massa contaminante ao fim de 17 dias	4,83E-04
Fugacidade Inicial 7° dia, Pa	7,06E+02	Fugacidade Inicial 18° dia, Pa	1,53E+02
Fugacidade, Pa	6,39E+02	Fugacidade, Pa	1,39E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,58E-01	Concentração no ar, mol/m3	5,59E-02
Massa contaminante ao fim de 7 dias	1,94E-03	Massa contaminante ao fim de 18 dias	4,21E-04
Fugacidade Inicial 8° dia, Pa	6,14E+02	Fugacidade Inicial 19° dia, Pa	1,33E+02
Fugacidade, Pa	5,56E+02	Fugacidade, Pa	1,21E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,24E-01	Concentração no ar, mol/m3	4,87E-02
Massa contaminante ao fim de 8 dias	1,69E-03	Massa contaminante ao fim de 19 dias	3,66E-04
Fugacidade Inicial 9° dia, Pa	5,35E+02	Fugacidade Inicial 20° dia, Pa	1,16E+02
Fugacidade, Pa	4,84E+02	Fugacidade, Pa	1,05E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,95E-01	Concentração no ar, mol/m3	4,24E-02
Massa contaminante ao fim de 9 dias	1,47E-03	Massa contaminante ao fim de 20 dias	3,19E-04
Fugacidade Inicial 10° dia, Pa	4,65E+02	Fugacidade Inicial 21° dia, Pa	1,01E+02
Fugacidade, Pa	4,21E+02	Fugacidade, Pa	9,14E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,70E-01	Concentração no ar, mol/m3	3,69E-02
Massa contaminante ao fim de 10 dias	1,28E-03	Massa contaminante ao fim de 21 dias	2,77E-04
Fugacidade Inicial 11° dia, Pa	4,05E+02	Fugacidade Inicial 22° dia, Pa	8,79E+01
Fugacidade, Pa	3,67E+02	Fugacidade, Pa	7,96E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,48E-01	Concentração no ar, mol/m3	3,21E-02
Massa contaminante ao fim de 11 dias	1,11E-03	Massa contaminante ao fim de 22 dias	2,41E-04
Total de contaminante bio-degradado, mol			3,57E-03

Ensaio 1 de Bio-ventilação Inoculado - Granito com Tolueno (BVS_R_T)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	8,71E+02	Fugacidade Inicial 9º dia, Pa	1,56E+02
Fugacidade, Pa	7,20E+02	Fugacidade, Pa	1,29E+02
Concentração no ar, mol/m ³	2,91E-01	Concentração no ar, mol/m ³	5,20E-02
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,50E-03	Massa contaminante ao fim de 9 dias	6,26E-04
Fugacidade Inicial 2º dia, Pa	7,02E+02	Fugacidade Inicial 10º dia, Pa	1,26E+02
Fugacidade, Pa	5,81E+02	Fugacidade, Pa	1,04E+02
Concentração no ar, mol/m ³	2,34E-01	Concentração no ar, mol/m ³	4,19E-02
Massa contaminante ao fim de 2 dias	2,82E-03	Massa contaminante ao fim de 10 dias	5,05E-04
Fugacidade Inicial 3º dia, Pa	5,66E+02	Fugacidade Inicial 11º dia, Pa	1,01E+02
Fugacidade, Pa	4,68E+02	Fugacidade, Pa	8,38E+01
Concentração no ar, mol/m ³	1,89E-01	Concentração no ar, mol/m ³	3,38E-02
Massa contaminante ao fim de 3 dias	2,28E-03	Massa contaminante ao fim de 11 dias	4,07E-04
Fugacidade Inicial 4º dia, Pa	4,57E+02	Fugacidade Inicial 12º dia, Pa	8,17E+01
Fugacidade, Pa	3,78E+02	Fugacidade, Pa	6,76E+01
Concentração no ar, mol/m ³	1,52E-01	Concentração no ar, mol/m ³	2,73E-02
Massa contaminante ao fim de 4 dias	1,84E-03	Massa contaminante ao fim de 12 dias	3,28E-04
Fugacidade Inicial 5º dia, Pa	3,68E+02	Fugacidade Inicial 13º dia, Pa	6,59E+01
Fugacidade, Pa	3,05E+02	Fugacidade, Pa	5,45E+01
Concentração no ar, mol/m ³	1,23E-01	Concentração no ar, mol/m ³	2,20E-02
Massa contaminante ao fim de 5 dias	1,48E-03	Massa contaminante ao fim de 13 dias	2,65E-04
Fugacidade Inicial 6º dia, Pa	2,97E+02	Fugacidade Inicial 14º dia, Pa	5,31E+01
Fugacidade, Pa	2,46E+02	Fugacidade, Pa	4,39E+01
Concentração no ar, mol/m ³	9,91E-02	Concentração no ar, mol/m ³	1,77E-02
Massa contaminante ao fim de 6 dias	1,19E-03	Massa contaminante ao fim de 14 dias	2,14E-04
Fugacidade Inicial 7º dia, Pa	2,40E+02	Fugacidade Inicial 15º dia, Pa	4,28E+01
Fugacidade, Pa	1,98E+02	Fugacidade, Pa	3,54E+01
Concentração no ar, mol/m ³	7,99E-02	Concentração no ar, mol/m ³	1,43E-02
Massa contaminante ao fim de 7 dias	9,63E-04	Massa contaminante ao fim de 15 dias	1,72E-04
Fugacidade Inicial 8º dia, Pa	1,93E+02		
Fugacidade, Pa	1,60E+02	Total de contaminante bio-degradado, mol	3,74E-03
Concentração no ar, mol/m ³	6,45E-02		
Massa contaminante ao fim de 8 dias	7,76E-04		

Ensaio 2 de Bio-ventilação Inoculado - Granito com Tolueno (BVS2_T)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	8,71E+02	Fugacidade Inicial 12° dia, Pa	1,89E+02
Fugacidade, Pa	7,77E+02	Fugacidade, Pa	1,69E+02
Concentração no ar, mol/m3	3,14E-01	Concentração no ar, mol/m3	6,82E-02
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,78E-03	Massa contaminante ao fim de 12 dias	8,22E-04
Fugacidade Inicial 2° dia, Pa	7,58E+02	Fugacidade Inicial 13° dia, Pa	1,65E+02
Fugacidade, Pa	6,77E+02	Fugacidade, Pa	1,47E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,73E-01	Concentração no ar, mol/m3	5,94E-02
Massa contaminante ao fim de 2 dias	3,29E-03	Massa contaminante ao fim de 13 dias	7,16E-04
Fugacidade Inicial 3° dia, Pa	6,60E+02	Fugacidade Inicial 14° dia, Pa	1,44E+02
Fugacidade, Pa	5,89E+02	Fugacidade, Pa	1,28E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,38E-01	Concentração no ar, mol/m3	5,17E-02
Massa contaminante ao fim de 3 dias	2,86E-03	Massa contaminante ao fim de 14 dias	6,23E-04
Fugacidade Inicial 4° dia, Pa	5,75E+02	Fugacidade Inicial 15° dia, Pa	1,25E+02
Fugacidade, Pa	5,13E+02	Fugacidade, Pa	1,12E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,07E-01	Concentração no ar, mol/m3	4,50E-02
Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,49E-03	Massa contaminante ao fim de 15 dias	5,42E-04
Fugacidade Inicial 5° dia, Pa	5,00E+02	Fugacidade Inicial 16° dia, Pa	1,09E+02
Fugacidade, Pa	4,46E+02	Fugacidade, Pa	9,71E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,80E-01	Concentração no ar, mol/m3	3,92E-02
Massa contaminante ao fim de 5 dias	2,17E-03	Massa contaminante ao fim de 16 dias	4,72E-04
Fugacidade Inicial 6° dia, Pa	4,35E+02	Fugacidade Inicial 17° dia, Pa	9,47E+01
Fugacidade, Pa	3,89E+02	Fugacidade, Pa	8,45E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,57E-01	Concentração no ar, mol/m3	3,41E-02
Massa contaminante ao fim de 6 dias	1,89E-03	Massa contaminante ao fim de 17 dias	4,11E-04
Fugacidade Inicial 7° dia, Pa	3,79E+02	Fugacidade Inicial 18° dia, Pa	8,25E+01
Fugacidade, Pa	3,38E+02	Fugacidade, Pa	7,36E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,36E-01	Concentração no ar, mol/m3	2,97E-02
Massa contaminante ao fim de 7 dias	1,64E-03	Massa contaminante ao fim de 18 dias	3,58E-04
Fugacidade Inicial 8° dia, Pa	3,30E+02	Fugacidade Inicial 19° dia, Pa	7,18E+01
Fugacidade, Pa	2,94E+02	Fugacidade, Pa	6,41E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,19E-01	Concentração no ar, mol/m3	2,58E-02
Massa contaminante ao fim de 8 dias	1,43E-03	Massa contaminante ao fim de 19 dias	3,11E-04
Fugacidade Inicial 9° dia, Pa	2,87E+02	Fugacidade Inicial 20° dia, Pa	6,25E+01
Fugacidade, Pa	2,56E+02	Fugacidade, Pa	5,58E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,03E-01	Concentração no ar, mol/m3	2,25E-02
Massa contaminante ao fim de 9 dias	1,25E-03	Massa contaminante ao fim de 20 dias	2,71E-04
Fugacidade Inicial 10° dia, Pa	2,50E+02	Fugacidade Inicial 21° dia, Pa	5,44E+01
Fugacidade, Pa	2,23E+02	Fugacidade, Pa	4,85E+01
Concentração no ar, mol/m3	9,00E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,96E-02
Massa contaminante ao fim de 10 dias	1,08E-03	Massa contaminante ao fim de 21 dias	2,36E-04
Fugacidade Inicial 11° dia, Pa	2,18E+02	Fugacidade Inicial 22° dia, Pa	4,74E+01
Fugacidade, Pa	1,94E+02	Fugacidade, Pa	4,23E+01
Concentração no ar, mol/m3	7,84E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,70E-02
Massa contaminante ao fim de 11 dias	9,44E-04	Massa contaminante ao fim de 22 dias	2,05E-04
Total de contaminante bio-degradado, mol			3,44E-03

Ensaio 1 de Bio-ventilação Inoculado - Granito com Etilbenzeno (BVSr_E)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	5,23E+02	Fugacidade Inicial 9º dia, Pa	1,55E+02
Fugacidade, Pa	4,57E+02	Fugacidade, Pa	1,35E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,84E-01	Concentração no ar, mol/m3	5,45E-02
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,24E-03	Massa contaminante ao fim de 9 dias	9,57E-04
Fugacidade Inicial 2º dia, Pa	4,49E+02	Fugacidade Inicial 10º dia, Pa	1,33E+02
Fugacidade, Pa	3,92E+02	Fugacidade, Pa	1,16E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,58E-01	Concentração no ar, mol/m3	4,68E-02
Massa contaminante ao fim de 2 dias	2,78E-03	Massa contaminante ao fim de 10 dias	8,22E-04
Fugacidade Inicial 3º dia, Pa	3,86E+02	Fugacidade Inicial 11º dia, Pa	1,14E+02
Fugacidade, Pa	3,37E+02	Fugacidade, Pa	9,97E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,36E-01	Concentração no ar, mol/m3	4,02E-02
Massa contaminante ao fim de 3 dias	2,39E-03	Massa contaminante ao fim de 11 dias	7,06E-04
Fugacidade Inicial 4º dia, Pa	3,31E+02	Fugacidade Inicial 12º dia, Pa	9,80E+01
Fugacidade, Pa	2,89E+02	Fugacidade, Pa	8,56E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,17E-01	Concentração no ar, mol/m3	3,45E-02
Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,05E-03	Massa contaminante ao fim de 12 dias	6,06E-04
Fugacidade Inicial 5º dia, Pa	2,84E+02	Fugacidade Inicial 13º dia, Pa	8,41E+01
Fugacidade, Pa	2,48E+02	Fugacidade, Pa	7,35E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,00E-01	Concentração no ar, mol/m3	2,97E-02
Massa contaminante ao fim de 5 dias	1,76E-03	Massa contaminante ao fim de 13 dias	5,21E-04
Fugacidade Inicial 6º dia, Pa	2,44E+02	Fugacidade Inicial 14º dia, Pa	7,23E+01
Fugacidade, Pa	2,13E+02	Fugacidade, Pa	6,31E+01
Concentração no ar, mol/m3	8,61E-02	Concentração no ar, mol/m3	2,55E-02
Massa contaminante ao fim de 6 dias	1,51E-03	Massa contaminante ao fim de 14 dias	4,47E-04
Fugacidade Inicial 7º dia, Pa	2,10E+02	Fugacidade Inicial 15º dia, Pa	6,21E+01
Fugacidade, Pa	1,83E+02	Fugacidade, Pa	5,42E+01
Concentração no ar, mol/m3	7,39E-02	Concentração no ar, mol/m3	2,19E-02
Massa contaminante ao fim de 7 dias	1,30E-03	Massa contaminante ao fim de 15 dias	3,84E-04
Fugacidade Inicial 8º dia, Pa	1,80E+02		
Fugacidade, Pa	1,57E+02	Total de contaminante bio-degradado, mol	3,03E-03
Concentração no ar, mol/m3	6,35E-02		
Massa contaminante ao fim de 8 dias	1,11E-03		

Ensaio 2 de Bio-ventilação Inoculado - Granito com Etilbenzeno (BVS2_E)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	5,23E+02	Fugacidade Inicial 13° dia, Pa	9,90E+01
Fugacidade, Pa	4,63E+02	Fugacidade, Pa	8,77E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,87E-01	Concentração no ar, mol/m3	3,54E-02
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,28E-03	Massa contaminante ao fim de 13 dias	6,21E-04
Fugacidade Inicial 2° dia, Pa	4,55E+02	Fugacidade Inicial 14° dia, Pa	8,62E+01
Fugacidade, Pa	4,03E+02	Fugacidade, Pa	7,63E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,63E-01	Concentração no ar, mol/m3	3,08E-02
Massa contaminante ao fim de 2 dias	2,85E-03	Massa contaminante ao fim de 14 dias	5,41E-04
Fugacidade Inicial 3° dia, Pa	3,96E+02	Fugacidade Inicial 15° dia, Pa	7,50E+01
Fugacidade, Pa	3,51E+02	Fugacidade, Pa	6,65E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,42E-01	Concentração no ar, mol/m3	2,68E-02
Massa contaminante ao fim de 3 dias	2,49E-03	Massa contaminante ao fim de 15 dias	4,71E-04
Fugacidade Inicial 4° dia, Pa	3,45E+02	Fugacidade Inicial 16° dia, Pa	6,53E+01
Fugacidade, Pa	3,05E+02	Fugacidade, Pa	5,78E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,23E-01	Concentração no ar, mol/m3	2,33E-02
Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,16E-03	Massa contaminante ao fim de 16 dias	4,10E-04
Fugacidade Inicial 5° dia, Pa	3,00E+02	Fugacidade Inicial 17° dia, Pa	5,69E+01
Fugacidade, Pa	2,66E+02	Fugacidade, Pa	5,04E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,07E-01	Concentração no ar, mol/m3	2,03E-02
Massa contaminante ao fim de 5 dias	1,88E-03	Massa contaminante ao fim de 17 dias	3,57E-04
Fugacidade Inicial 6° dia, Pa	2,61E+02	Fugacidade Inicial 18° dia, Pa	4,95E+01
Fugacidade, Pa	2,31E+02	Fugacidade, Pa	4,38E+01
Concentração no ar, mol/m3	9,34E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,77E-02
Massa contaminante ao fim de 6 dias	1,64E-03	Massa contaminante ao fim de 18 dias	3,10E-04
Fugacidade Inicial 7° dia, Pa	2,28E+02	Fugacidade Inicial 19° dia, Pa	4,31E+01
Fugacidade, Pa	2,01E+02	Fugacidade, Pa	3,82E+01
Concentração no ar, mol/m3	8,13E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,54E-02
Massa contaminante ao fim de 7 dias	1,43E-03	Massa contaminante ao fim de 19 dias	2,70E-04
Fugacidade Inicial 8° dia, Pa	1,98E+02	Fugacidade Inicial 20° dia, Pa	3,75E+01
Fugacidade, Pa	1,75E+02	Fugacidade, Pa	3,32E+01
Concentração no ar, mol/m3	7,08E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,34E-02
Massa contaminante ao fim de 8 dias	1,24E-03	Massa contaminante ao fim de 20 dias	2,35E-04
Fugacidade Inicial 9° dia, Pa	1,72E+02	Fugacidade Inicial 21° dia, Pa	3,27E+01
Fugacidade, Pa	1,53E+02	Fugacidade, Pa	2,89E+01
Concentração no ar, mol/m3	6,16E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,17E-02
Massa contaminante ao fim de 9 dias	1,08E-03	Massa contaminante ao fim de 21 dias	2,05E-04
Fugacidade Inicial 10° dia, Pa	1,50E+02	Fugacidade Inicial 22° dia, Pa	2,84E+01
Fugacidade, Pa	1,33E+02	Fugacidade, Pa	2,52E+01
Concentração no ar, mol/m3	5,36E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,02E-02
Massa contaminante ao fim de 10 dias	9,41E-04	Massa contaminante ao fim de 22 dias	1,78E-04
Fugacidade Inicial 11° dia, Pa	1,31E+02	Fugacidade Inicial 23° dia, Pa	2,47E+01
Fugacidade, Pa	1,16E+02	Fugacidade, Pa	2,19E+01
Concentração no ar, mol/m3	4,67E-02	Concentração no ar, mol/m3	8,84E-03
Massa contaminante ao fim de 11 dias	8,20E-04	Massa contaminante ao fim de 23 dias	1,55E-04
Fugacidade Inicial 12° dia, Pa	1,14E+02		
Fugacidade, Pa	1,01E+02	Total de contaminante bio-degradado, mol	3,20E-03
Concentração no ar, mol/m3	4,06E-02		
Massa contaminante ao fim de 12 dias	7,13E-04		

Ensaio 1 de Bio-ventilação Inoculado - Granito com Xileno (BVSX_X)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	3,63E+02	Fugacidade Inicial 13° dia, Pa	1,08E+02
Fugacidade, Pa	3,32E+02	Fugacidade, Pa	9,84E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,34E-01	Concentração no ar, mol/m3	3,97E-02
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,40E-03	Massa contaminante ao fim de 13 dias	1,01E-03
Fugacidade Inicial 2° dia, Pa	3,28E+02	Fugacidade Inicial 14° dia, Pa	9,73E+01
Fugacidade, Pa	3,00E+02	Fugacidade, Pa	8,89E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,21E-01	Concentração no ar, mol/m3	3,59E-02
Massa contaminante ao fim de 2 dias	3,08E-03	Massa contaminante ao fim de 14 dias	9,12E-04
Fugacidade Inicial 3° dia, Pa	2,96E+02	Fugacidade Inicial 15° dia, Pa	8,79E+01
Fugacidade, Pa	2,71E+02	Fugacidade, Pa	8,04E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,09E-01	Concentração no ar, mol/m3	3,24E-02
Massa contaminante ao fim de 3 dias	2,78E-03	Massa contaminante ao fim de 15 dias	8,25E-04
Fugacidade Inicial 4° dia, Pa	2,68E+02	Fugacidade Inicial 16° dia, Pa	7,94E+01
Fugacidade, Pa	2,45E+02	Fugacidade, Pa	7,26E+01
Concentração no ar, mol/m3	9,88E-02	Concentração no ar, mol/m3	2,93E-02
Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,51E-03	Massa contaminante ao fim de 16 dias	7,45E-04
Fugacidade Inicial 5° dia, Pa	2,42E+02	Fugacidade Inicial 17° dia, Pa	7,18E+01
Fugacidade, Pa	2,21E+02	Fugacidade, Pa	6,56E+01
Concentração no ar, mol/m3	8,93E-02	Concentração no ar, mol/m3	2,65E-02
Massa contaminante ao fim de 5 dias	2,27E-03	Massa contaminante ao fim de 17 dias	6,73E-04
Fugacidade Inicial 6° dia, Pa	2,19E+02	Fugacidade Inicial 18° dia, Pa	6,49E+01
Fugacidade, Pa	2,00E+02	Fugacidade, Pa	5,93E+01
Concentração no ar, mol/m3	8,07E-02	Concentração no ar, mol/m3	2,39E-02
Massa contaminante ao fim de 6 dias	2,05E-03	Massa contaminante ao fim de 18 dias	6,08E-04
Fugacidade Inicial 7° dia, Pa	1,98E+02	Fugacidade Inicial 19° dia, Pa	5,86E+01
Fugacidade, Pa	1,81E+02	Fugacidade, Pa	5,36E+01
Concentração no ar, mol/m3	7,29E-02	Concentração no ar, mol/m3	2,16E-02
Massa contaminante ao fim de 7 dias	1,85E-03	Massa contaminante ao fim de 19 dias	5,50E-04
Fugacidade Inicial 8° dia, Pa	1,79E+02	Fugacidade Inicial 20° dia, Pa	5,30E+01
Fugacidade, Pa	1,63E+02	Fugacidade, Pa	4,84E+01
Concentração no ar, mol/m3	6,59E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,95E-02
Massa contaminante ao fim de 8 dias	1,68E-03	Massa contaminante ao fim de 20 dias	4,97E-04
Fugacidade Inicial 9° dia, Pa	1,61E+02	Fugacidade Inicial 21° dia, Pa	4,79E+01
Fugacidade, Pa	1,48E+02	Fugacidade, Pa	4,38E+01
Concentração no ar, mol/m3	5,95E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,77E-02
Massa contaminante ao fim de 9 dias	1,51E-03	Massa contaminante ao fim de 21 dias	4,49E-04
Fugacidade Inicial 10° dia, Pa	1,46E+02	Fugacidade Inicial 22° dia, Pa	4,33E+01
Fugacidade, Pa	1,33E+02	Fugacidade, Pa	3,95E+01
Concentração no ar, mol/m3	5,38E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,60E-02
Massa contaminante ao fim de 10 dias	1,37E-03	Massa contaminante ao fim de 22 dias	4,06E-04
Fugacidade Inicial 11° dia, Pa	1,32E+02	Fugacidade Inicial 23° dia, Pa	3,91E+01
Fugacidade, Pa	1,21E+02	Fugacidade, Pa	3,57E+01
Concentração no ar, mol/m3	4,86E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,44E-02
Massa contaminante ao fim de 11 dias	1,24E-03	Massa contaminante ao fim de 23 dias	3,67E-04
Fugacidade Inicial 12° dia, Pa	1,19E+02	Fugacidade Inicial 24° dia, Pa	3,53E+01
Fugacidade, Pa	1,09E+02	Fugacidade, Pa	3,23E+01
Concentração no ar, mol/m3	4,39E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,30E-02
Massa contaminante ao fim de 12 dias	1,12E-03	Massa contaminante ao fim de 24 dias	3,31E-04

Ensaio 1 de Bio-ventilação Inoculado - Granito com Xileno (BVSX_X), continuação

Fugacidade Inicial 25° dia , Pa	3,19E+01	Fugacidade Inicial 27° dia, Pa	2,61E+01
Fugacidade, Pa	2,92E+01	Fugacidade, Pa	2,38E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,18E-02	Concentração no ar, mol/m3	9,62E-03
Massa contaminante ao fim de 25 dias	2,99E-04	Massa contaminante ao fim de 27 dias	2,45E-04
Fugacidade Inicial 26° dia, Pa	2,88E+01		
Fugacidade, Pa	2,64E+01	Total de contaminante bio-degradado, mol	3,13E-03
Concentração no ar, mol/m3	1,06E-02		
Massa contaminante ao fim de 26 dias	2,71E-04		

Ensaio 2 de Bio-ventilação Inoculado - Granito com Xileno (BVSX2_X)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	3,63E+02	Fugacidade Inicial 11° dia, Pa	5,25E+01
Fugacidade, Pa	3,03E+02	Fugacidade, Pa	4,38E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,22E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,77E-02
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,10E-03	Massa contaminante ao fim de 11 dias	4,49E-04
Fugacidade Inicial 2° dia, Pa	2,99E+02	Fugacidade Inicial 12° dia, Pa	4,32E+01
Fugacidade, Pa	2,50E+02	Fugacidade, Pa	3,61E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,01E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,46E-02
Massa contaminante ao fim de 2 dias	2,56E-03	Massa contaminante ao fim de 12 dias	3,70E-04
Fugacidade Inicial 3° dia, Pa	2,46E+02	Fugacidade Inicial 13° dia, Pa	3,56E+01
Fugacidade, Pa	2,06E+02	Fugacidade, Pa	2,97E+01
Concentração no ar, mol/m3	8,30E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,20E-02
Massa contaminante ao fim de 3 dias	2,11E-03	Massa contaminante ao fim de 13 dias	3,05E-04
Fugacidade Inicial 4° dia, Pa	2,03E+02	Fugacidade Inicial 14° dia, Pa	2,94E+01
Fugacidade, Pa	1,69E+02	Fugacidade, Pa	2,45E+01
Concentração no ar, mol/m3	6,84E-02	Concentração no ar, mol/m3	9,88E-03
Massa contaminante ao fim de 4 dias	1,74E-03	Massa contaminante ao fim de 14 dias	2,51E-04
Fugacidade Inicial 5° dia, Pa	1,67E+02	Fugacidade Inicial 15° dia, Pa	2,42E+01
Fugacidade, Pa	1,40E+02	Fugacidade, Pa	2,02E+01
Concentração no ar, mol/m3	5,63E-02	Concentração no ar, mol/m3	8,15E-03
Massa contaminante ao fim de 5 dias	1,43E-03	Massa contaminante ao fim de 15 dias	2,07E-04
Fugacidade Inicial 6° dia, Pa	1,38E+02	Fugacidade Inicial 16° dia, Pa	1,99E+01
Fugacidade, Pa	1,15E+02	Fugacidade, Pa	1,66E+01
Concentração no ar, mol/m3	4,64E-02	Concentração no ar, mol/m3	6,71E-03
Massa contaminante ao fim de 6 dias	1,18E-03	Massa contaminante ao fim de 16 dias	1,71E-04
Fugacidade Inicial 7° dia, Pa	1,14E+02	Fugacidade Inicial 17° dia, Pa	1,64E+01
Fugacidade, Pa	9,49E+01	Fugacidade, Pa	1,37E+01
Concentração no ar, mol/m3	3,83E-02	Concentração no ar, mol/m3	5,53E-03
Massa contaminante ao fim de 7 dias	9,73E-04	Massa contaminante ao fim de 17 dias	1,41E-04
Fugacidade Inicial 8° dia, Pa	9,37E+01	Fugacidade Inicial 18° dia, Pa	1,35E+01
Fugacidade, Pa	7,82E+01	Fugacidade, Pa	1,13E+01
Concentração no ar, mol/m3	3,15E-02	Concentração no ar, mol/m3	4,56E-03
Massa contaminante ao fim de 8 dias	8,02E-04	Massa contaminante ao fim de 18 dias	1,16E-04
Fugacidade Inicial 9° dia, Pa	7,72E+01	Fugacidade Inicial 19° dia, Pa	1,12E+01
Fugacidade, Pa	6,44E+01	Fugacidade, Pa	9,32E+00
Concentração no ar, mol/m3	2,60E-02	Concentração no ar, mol/m3	3,76E-03
Massa contaminante ao fim de 9 dias	6,61E-04	Massa contaminante ao fim de 19 dias	9,55E-05
Fugacidade Inicial 10° dia, Pa	6,37E+01	Fugacidade Inicial 20° dia, Pa	9,20E+00
Fugacidade, Pa	5,31E+01	Fugacidade, Pa	7,68E+00
Concentração no ar, mol/m3	2,14E-02	Concentração no ar, mol/m3	3,10E-03
Massa contaminante ao fim de 10 dias	5,45E-04	Massa contaminante ao fim de 20 dias	7,87E-05

Ensaio 2 de Bio-ventilação Inoculado - Granito com Xileno (BVSr2_X), continuação

Fugacidade Inicial 21° dia, Pa	7,58E+00	Fugacidade Inicial 25° dia, Pa	3,50E+00
Fugacidade, Pa	6,33E+00	Fugacidade, Pa	2,92E+00
Concentração no ar, mol/m3	2,55E-03	Concentração no ar, mol/m3	1,18E-03
Massa contaminante ao fim de 21 dias	6,49E-05	Massa contaminante ao fim de 25 dias	2,99E-05
Fugacidade Inicial 22° dia, Pa	6,25E+00	Fugacidade Inicial 26° dia, Pa	2,88E+00
Fugacidade, Pa	5,22E+00	Fugacidade, Pa	2,41E+00
Concentração no ar, mol/m3	2,10E-03	Concentração no ar, mol/m3	9,71E-04
Massa contaminante ao fim de 22 dias	5,35E-05	Massa contaminante ao fim de 26 dias	2,47E-05
Fugacidade Inicial 23° dia, Pa	5,15E+00	Fugacidade Inicial 27° dia, Pa	2,38E+00
Fugacidade, Pa	4,30E+00	Fugacidade, Pa	1,98E+00
Concentração no ar, mol/m3	1,73E-03	Concentração no ar, mol/m3	8,00E-04
Massa contaminante ao fim de 23 dias	4,41E-05	Massa contaminante ao fim de 27 dias	2,03E-05
Fugacidade Inicial 24° dia, Pa	4,25E+00	Fugacidade Inicial 28° dia, Pa	1,96E+00
Fugacidade, Pa	3,54E+00	Fugacidade, Pa	1,63E+00
Concentração no ar, mol/m3	1,43E-03	Concentração no ar, mol/m3	6,59E-04
Massa contaminante ao fim de 24 dias	3,63E-05	Massa contaminante ao fim de 28 dias	1,68E-05
Total de contaminante bio-degradado, mol			3,54E-03

Ensaio de Bio-ventilação Inoculado - Granito com BTEoX (BVSr_BTEoX)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	6,50E+02	Fugacidade Inicial 8° dia, Pa	1,40E+02
Fugacidade, Pa	5,33E+02	Fugacidade, Pa	1,15E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,15E-01	Concentração no ar, mol/m3	4,64E-02
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,36E-03	Massa contaminante ao fim de 8 dias	7,26E-04
Fugacidade Inicial 2° dia, Pa	5,22E+02	Fugacidade Inicial 9° dia, Pa	1,13E+02
Fugacidade, Pa	4,28E+02	Fugacidade, Pa	9,24E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,73E-01	Concentração no ar, mol/m3	3,73E-02
Massa contaminante ao fim de 2 dias	2,70E-03	Massa contaminante ao fim de 9 dias	5,83E-04
Fugacidade Inicial 3° dia, Pa	4,19E+02	Fugacidade Inicial 10° dia, Pa	9,06E+01
Fugacidade, Pa	3,44E+02	Fugacidade, Pa	7,42E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,39E-01	Concentração no ar, mol/m3	3,00E-02
Massa contaminante ao fim de 3 dias	2,17E-03	Massa contaminante ao fim de 10 dias	4,68E-04
Fugacidade Inicial 4° dia, Pa	3,37E+02	Fugacidade Inicial 11° dia, Pa	7,28E+01
Fugacidade, Pa	2,76E+02	Fugacidade, Pa	5,96E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,11E-01	Concentração no ar, mol/m3	2,41E-02
Massa contaminante ao fim de 4 dias	1,74E-03	Massa contaminante ao fim de 11 dias	3,76E-04
Fugacidade Inicial 5° dia, Pa	2,71E+02	Fugacidade Inicial 12° dia, Pa	5,85E+01
Fugacidade, Pa	2,22E+02	Fugacidade, Pa	4,79E+01
Concentração no ar, mol/m3	8,95E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,93E-02
Massa contaminante ao fim de 5 dias	1,40E-03	Massa contaminante ao fim de 12 dias	3,02E-04
Fugacidade Inicial 6° dia, Pa	2,18E+02	Fugacidade Inicial 13° dia, Pa	4,70E+01
Fugacidade, Pa	1,78E+02	Fugacidade, Pa	3,85E+01
Concentração no ar, mol/m3	7,19E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,55E-02
Massa contaminante ao fim de 6 dias	1,12E-03	Massa contaminante ao fim de 13 dias	2,43E-04
Fugacidade Inicial 7° dia, Pa	1,75E+02	Fugacidade Inicial 14° dia, Pa	3,77E+01
Fugacidade, Pa	1,43E+02	Fugacidade, Pa	3,09E+01
Concentração no ar, mol/m3	5,78E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,25E-02
Massa contaminante ao fim de 7 dias	9,03E-04	Massa contaminante ao fim de 14 dias	1,95E-04
Total de contaminante bio-degradado, mol			3,67E-03

**Ensaio de Bio-ventilação - Xisto com Benzeno
(BVbXT_B e BVXT_B)**

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura interna da coluna, m	5,00E-01	Nome	Benzeno
Altura do solo, m	1,80E-01	Fórmula	C6H6
Volume de ar, L	2,51E+00	Massa Molecular	7,81E+01
		Constante Henry adimensional	2,33E-01
		Constante Henry , Pa,m ³ /mol	5,76E+02
Composição do solo:		Coeficiente partilha carbono orgânico, Kco, L/kg	6,76E+01
Humidade volumétrica	1,80E-01	Coeficiente partilha MO, Kmo, L/kg	3,79E+01
Porosidade volumétrica total	5,60E-01	Coeficiente partilha solo-água, L/kg	3,37E-01
Fracção vazios com ar	3,80E-01	Coeficiente partilha MM-água, L/kg	3,38E-02
Fracção Matéria Orgânica	8,89E-03		
Fracção Matéria Mineral	4,31E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	4,98E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	5,00E-04	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,73E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	6,57E-02
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	1,64E-04
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	1,12E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,80E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	1,23E-06
Volumes:		Água, mol/Pa	4,41E-07
Solo Total, m ³	1,41E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	8,26E-07
Água, m ³	2,54E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	1,00E-07
Ar, m ³	5,37E-04		
Matéria Orgânica, m ³	1,26E-05	TOTAL	2,60E-06
Matéria Mineral, m ³	6,09E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	1,97E+03
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,40E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	4,00E-04	Ar, mol/m ³	7,95E-01
Quantidade total contaminante, mol	5,12E-03	Água, mol/m ³	3,42E+00
Concentração média, mg/kg	2,03E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,29E+02
Concentração média, mmol/kg	2,59E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	3,24E-01
		Massas em cada compartimento:	
		Ar, mol	2,43E-03
		Água, mol	8,70E-04
		Matéria orgânica, mol	1,63E-03
		Matéria mineral, mol	1,97E-04
		TOTAL	5,12E-03
		BVbXT_B	BVXT_B
Semi-vida, h		1,08E+02	6,50E+00
Constante cinética,, h ⁻¹		6,42E-03	1,07E-01
Dr, mol/(Pa,h)		1,02E-08	1,69E-07
Constante Cinética Global, h ⁻¹		3,91E-03	6,50E-02
Vol. ar extraído diariamente, m ³		3,00E-04	

**Ensaio de Bio-ventilação - Xisto com Tolueno
(BVbXT_T e BVXT_T)**

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura interna da coluna, m	5,00E-01	Nome	Tolueno
Altura do solo, m	1,80E-01	Fórmula	C ₇ H ₈
Volume de ar, L	2,51E+00	Massa Molecular	9,22E+01
		Constante Henry adimensional	2,76E-01
Composição do solo:		Constante Henry, Pa,m ³ /mol	6,83E+02
Humidade volumétrica	1,80E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	2,04E+02
Porosidade volumétrica total	5,60E-01	Coeficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	1,14E+02
Fracção vazios com ar	3,80E-01	Coeficiente partilha solo-água, L/kg	1,02E+00
Fracção Matéria Orgânica	8,89E-03	Coeficiente partilha MM-água, L/kg	1,02E-01
Fracção Matéria Mineral	4,31E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	4,98E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	5,00E-04	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,46E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	1,67E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	4,18E-04
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	2,09E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,80E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	1,23E-06
Volumes:		Água, mol/Pa	3,72E-07
Solo Total, m ³	1,41E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	2,10E-06
Água, m ³	2,54E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	2,55E-07
Ar, m ³	5,37E-04	TOTAL	3,96E-06
Matéria Orgânica, m ³	1,26E-05		
Matéria Mineral, m ³	6,09E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	1,10E+03
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,40E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	4,00E-04	Ar, mol/m ³	4,42E-01
Quantidade total contaminante, mol	4,34E-03	Água, mol/m ³	1,60E+00
Concentração média, mg/kg	2,03E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,83E+02
Concentração média, mmol/kg	2,20E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	4,58E-01
		Massas em cada compartimento:	
		Ar, mol	1,35E-03
		Água, mol	4,08E-04
		Matéria orgânica, mol	2,31E-03
		Matéria mineral, mol	2,79E-04
		TOTAL	4,34E-03
		BVbXT_T	BVXT_T
Semi-vida, h		1,72E+02	1,80E+01
Constante cinética,, h ⁻¹		4,03E-03	3,85E-02
Dr, mol/(Pa,h)		1,19E-08	1,14E-07
Constante Cinética Global, h ⁻¹		3,00E-03	2,87E-02
Vol. ar extraído diariamente, m ³		3,00E-04	

**Ensaio de Bio-ventilação - Xisto com Etilbenzeno
(BVbXT_E e BVXT_E)**

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura interna da coluna, m	5,00E-01	Nome	Etilbenzeno
Altura do solo, m	1,80E-01	Fórmula	C ₈ H ₁₀
Volume de ar, L	2,51E+00	Massa Molecular	1,06E+02
		Constante Henry adimensional	3,48E-01
Composição do solo:		Constante Henry, Pa,m ³ /mol	8,62E+02
Humidade volumétrica	1,80E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	4,47E+02
Porosidade volumétrica total	5,60E-01	Coeficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	2,50E+02
Fracção vazios com ar	3,80E-01	Coeficiente partilha solo-água, L/kg	2,22E+00
Fracção Matéria Orgânica	8,89E-03	Coeficiente partilha MM-água, L/kg	2,41E+00
Fracção Matéria Mineral	4,31E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	4,98E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	5,40E-03	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,16E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	2,90E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	7,84E-03
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	6,32E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,80E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	1,23E-06
Volumes:		Água, mol/Pa	2,95E-07
Solo Total, m ³	1,41E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	3,65E-06
Água, m ³	2,54E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	4,78E-06
Ar, m ³	5,37E-04	TOTAL	9,95E-06
Matéria Orgânica, m ³	1,26E-05		
Matéria Mineral, m ³	6,09E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	3,79E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,40E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	4,00E-04	Ar, mol/m ³	1,53E-01
Quantidade total contaminante, mol	3,77E-03	Água, mol/m ³	4,39E-01
Concentração média, mg/kg	2,03E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	1,10E+02
Concentração média, mmol/kg	1,91E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	2,97E+00
		Massas em cada compartimento:	
		Ar, mol	4,66E-04
		Água, mol	1,12E-04
		Matéria orgânica, mol	1,38E-03
		Matéria mineral, mol	1,81E-03
		TOTAL	3,77E-03
		BVbXT_E	BVXT_E
Semi-vida, h		9,60E+01	2,40E+01
Constante cinética,, h ⁻¹		7,22E-03	2,89E-02
Dr, mol/(Pa,h)		3,32E-08	1,33E-07
Constante Cinética Global, h ⁻¹		5,92E-03	2,37E-02
Vol. ar extraído diariamente, m ³		3,00E-04	

**Ensaio de Bio-ventilação - Xisto com Xileno
(BVbXT_X e BVXT_X)**

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura interna da coluna, m	5,00E-01	Nome	Xileno
Altura do solo, m	1,80E-01	Fórmula	C ₈ H ₁₀
Volume de ar, L	2,51E+00	Massa Molecular	1,06E+02
		Constante Henry adimensional	2,23E-01
Composição do solo:		Constante Henry, Pa,m ³ /mol	5,76E+02
Humidade volumétrica	1,80E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, K _{co} , L/kg	4,57E+02
Porosidade volumétrica total	5,60E-01	Coeficiente partilha MO, K _{mo} , L/kg	2,56E+02
Fracção vazios com ar	3,80E-01	Coeficiente partilha solo-água, L/kg	2,28E+00
Fracção Matéria Orgânica	8,89E-03	Coeficiente partilha MM-água, L/kg	2,29E-01
Fracção Matéria Mineral	4,31E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	4,98E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	5,00E-04	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,73E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	4,44E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	1,11E-03
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	4,89E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,80E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	1,23E-06
Volumes:		Água, mol/Pa	4,41E-07
Solo Total, m ³	1,41E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	5,58E-06
Água, m ³	2,54E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	6,77E-07
Ar, m ³	5,37E-04	TOTAL	7,93E-06
Matéria Orgânica, m ³	1,26E-05		
Matéria Mineral, m ³	6,09E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	4,75E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,40E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	4,00E-04	Ar, mol/m ³	1,92E-01
Quantidade total contaminante, mol	3,77E-03	Água, mol/m ³	8,24E-01
Concentração média, mg/kg	2,03E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	2,11E+02
Concentração média, mmol/kg	1,91E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	5,27E-01
		Massas em cada compartimento:	
		Ar, mol	5,84E-04
		Água, mol	2,10E-04
		Matéria orgânica, mol	2,65E-03
		Matéria mineral, mol	3,21E-04
		TOTAL	3,77E-03
		BVbXT_X	BVXT_X
Semi-vida, h	1,20E+02	6,00E+01	
Constante cinética,, h ⁻¹	5,78E-03	1,16E-02	
Dr, mol/(Pa,h)	4,00E-08	7,99E-08	
Constante Cinética Global, h ⁻¹	5,04E-03	1,01E-02	
Vol. ar extraído diariamente, m ³		3,00E-04	

**Ensaio de Bio-ventilação - Xisto com BTEoX
(BVbXT_BTEoX e BVXT_BTEoX)**

Área, m ²	7,85E-03	Contaminante:	
Altura interna da coluna, m	5,00E-01	Nome	BTEoX
Altura do solo, m	1,80E-01	Fórmula	
Volume de ar, L	2,51E+00	Massa Molecular	9,57E+01
		Constante Henry adimensional	2,65E-01
Composição do solo:		Constante Henry, Pa,m ³ /mol	6,62E+02
Humidade volumétrica	1,80E-01	Coeficiente partilha carbono orgânico, Kco, L/kg	2,86E+02
Porosidade volumétrica total	5,60E-01	Coeficiente partilha MO, Kmo, L/kg	1,60E+02
Fracção vazios com ar	3,80E-01	Coeficiente partilha solo-água, L/kg	1,43E+00
Fracção Matéria Orgânica	8,89E-03	Coeficiente partilha MM-água, L/kg	1,43E-01
Fracção Matéria Mineral	4,31E-01		
Fracção Carbono Orgânico na MO	5,60E-01	Capacidades compartimentais (Z):	
Fracção Carbono Orgânico Solo	4,98E-03	Ar, mol/(m ³ ,Pa)	4,03E-04
Fracção de argila considerada	5,00E-04	Água, mol/(m ³ ,Pa)	1,51E-03
Densidades:		Matéria Orgânica, mol/(m ³ ,Pa)	2,42E-01
AR, kg/m ³	1,20E+00	Matéria Mineral, mol/(m ³ ,Pa)	6,06E-04
Água, kg/m ³	1,00E+03	TOTAL PONDERAL, mol/(m ³ ,Pa)	2,84E-03
Matéria Orgânica, kg/m ³	1,00E+03		
Matéria Mineral, kg/m ³	2,80E+03	Produtos VZ:	
		Ar, mol/Pa	1,23E-06
Volumes:		Água, mol/Pa	3,85E-07
Solo Total, m ³	1,41E-03	Matéria Orgânica, mol/Pa	3,05E-06
Água, m ³	2,54E-04	Matéria Mineral, mol/Pa	3,69E-07
Ar, m ³	5,37E-04	TOTAL	5,03E-06
Matéria Orgânica, m ³	1,26E-05		
Matéria Mineral, m ³	6,09E-04	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	8,31E+02
Densidade a granel do solo, kg/m ³	1,40E+03	Concentrações:	
Quantidade total contaminante, kg	4,00E-04	Ar, mol/m ³	3,35E-01
Quantidade total contaminante, mol	4,18E-03	Água, mol/m ³	1,26E+00
Concentração média, mg/kg	2,03E+02	Matéria Orgânica, mol/m ³	2,01E+02
Concentração média, mmol/kg	2,12E+00	Matéria Mineral, mol/m ³	5,03E-01
		Massas em cada compartimento:	
		Ar, mol	1,02E-03
		Água, mol	3,20E-04
		Matéria orgânica, mol	2,53E-03
		Matéria mineral, mol	3,07E-04
		TOTAL	4,18E-03
		BVbXT_BTEoX	BVXT_BTEoX
Semi-vida, h		1,44E+02	2,00E+01
Constante cinética,, h ⁻¹		4,81E-03	3,47E-02
Dr, mol/(Pa,h)		1,93E-08	1,39E-07
Constante Cinética Global, h ⁻¹		3,84E-03	2,77E-02
Vol. ar extraído diariamente, m ³		3,00E-04	

**Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado
Xisto com Benzeno (BVbXT_B)**

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	1,97E+03
Fugacidade, Pa	1,79E+03
Concentração no ar, mol/m3	7,24E-01
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	4,44E-03
Fugacidade inicial no 2º dia, Pa	1,71E+03
Fugacidade, Pa	1,56E+03
Concentração no ar, mol/m3	6,28E-01
Massa contaminante ao fim de 2 dias	3,86E-03
Fugacidade inicial no 3º dia, Pa	1,48E+03
Fugacidade, Pa	1,35E+03
Concentração no ar, mol/m3	5,45E-01
Massa contaminante ao fim de 3 dias	3,35E-03
Fugacidade inicial no 4º dia, Pa	1,29E+03
Fugacidade, Pa	1,17E+03
Concentração no ar, mol/m3	4,73E-01
Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,90E-03
Fugacidade inicial no 5º dia, Pa	1,12E+03
Fugacidade, Pa	1,02E+03
Concentração no ar, mol/m3	4,11E-01
Massa contaminante ao fim de 5 dias	2,52E-03
Fugacidade inicial no 6º dia, Pa	9,70E+02
Fugacidade, Pa	8,83E+02
Concentração no ar, mol/m3	3,56E-01
Massa contaminante ao fim de 6 dias	2,19E-03
Fugacidade inicial no 7º dia, Pa	8,42E+02
Fugacidade, Pa	7,67E+02
Concentração no ar, mol/m3	3,09E-01
Massa contaminante ao fim de 7 dias	1,90E-03
Fugacidade inicial no 8º dia, Pa	7,31E+02
Fugacidade, Pa	6,65E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,68E-01
Massa contaminante ao fim de 8 dias	1,65E-03
Fugacidade inicial no 9º dia, Pa	6,34E+02
Fugacidade, Pa	5,78E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,33E-01
Massa contaminante ao fim de 9 dias	1,43E-03

**Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado
Xisto com Tolueno (BVbXT_T)**

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	1,10E+03
Fugacidade, Pa	1,02E+03
Concentração no ar, mol/m3	4,11E-01
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,92E-03
Fugacidade inicial no 2º dia, Pa	9,88E+02
Fugacidade, Pa	9,20E+02
Concentração no ar, mol/m3	3,71E-01
Massa contaminante ao fim de 2 dias	3,53E-03
Fugacidade inicial no 3º dia, Pa	8,92E+02
Fugacidade, Pa	8,30E+02
Concentração no ar, mol/m3	3,35E-01
Massa contaminante ao fim de 3 dias	3,19E-03
Fugacidade inicial no 4º dia, Pa	8,04E+02
Fugacidade, Pa	7,48E+02
Concentração no ar, mol/m3	3,02E-01
Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,87E-03
Fugacidade inicial no 5º dia, Pa	7,26E+02
Fugacidade, Pa	6,75E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,72E-01
Massa contaminante ao fim de 5 dias	2,59E-03
Fugacidade inicial no 6º dia, Pa	6,55E+02
Fugacidade, Pa	6,09E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,46E-01
Massa contaminante ao fim de 6 dias	2,34E-03
Fugacidade inicial no 7º dia, Pa	5,90E+02
Fugacidade, Pa	5,49E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,22E-01
Massa contaminante ao fim de 7 dias	2,11E-03
Fugacidade inicial no 8º dia, Pa	5,33E+02
Fugacidade, Pa	4,96E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,00E-01
Massa contaminante ao fim de 8 dias	1,90E-03
Fugacidade inicial no 9º dia, Pa	4,81E+02
Fugacidade, Pa	4,47E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,80E-01
Massa contaminante ao fim de 9 dias	1,72E-03
Fugacidade inicial no 10º dia, Pa	4,33E+02
Fugacidade, Pa	4,03E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,63E-01
Massa contaminante ao fim de 10 dias	1,55E-03

Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado Xisto com Etilbenzeno (BVbXT_E)		Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado Xisto com Xileno (BVbXT_X)	
Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	6,71E+02	Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	4,75E+02
Fugacidade, Pa	5,82E+02	Fugacidade, Pa	4,21E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,35E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,70E-01
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,20E-03	Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,29E-03
Fugacidade inicial no 2º dia, Pa	5,69E+02	Fugacidade inicial no 2º dia, Pa	4,14E+02
Fugacidade, Pa	4,94E+02	Fugacidade, Pa	3,67E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,99E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,48E-01
Massa contaminante ao fim de 2 dias	2,71E-03	Massa contaminante ao fim de 2 dias	2,87E-03
Fugacidade inicial no 3º dia, Pa	4,83E+02	Fugacidade inicial no 3º dia, Pa	3,62E+02
Fugacidade, Pa	4,19E+02	Fugacidade, Pa	3,20E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,69E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,29E-01
Massa contaminante ao fim de 3 dias	2,30E-03	Massa contaminante ao fim de 3 dias	2,50E-03
Fugacidade inicial no 4º dia, Pa	4,10E+02	Fugacidade inicial no 4º dia, Pa	3,15E+02
Fugacidade, Pa	3,56E+02	Fugacidade, Pa	2,79E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,43E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,13E-01
Massa contaminante ao fim de 4 dias	1,95E-03	Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,18E-03
Fugacidade inicial no 5º dia, Pa	3,48E+02	Fugacidade inicial no 5º dia, Pa	2,75E+02
Fugacidade, Pa	3,02E+02	Fugacidade, Pa	2,44E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,22E-01	Concentração no ar, mol/m3	9,84E-02
Massa contaminante ao fim de 5 dias	1,66E-03	Massa contaminante ao fim de 5 dias	1,90E-03
Fugacidade inicial no 6º dia, Pa	2,95E+02	Fugacidade inicial no 6º dia, Pa	2,40E+02
Fugacidade, Pa	2,56E+02	Fugacidade, Pa	2,13E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,03E-01	Concentração no ar, mol/m3	8,58E-02
Massa contaminante ao fim de 6 dias	1,41E-03	Massa contaminante ao fim de 6 dias	1,66E-03
Fugacidade inicial no 7º dia, Pa	2,51E+02	Fugacidade inicial no 7º dia, Pa	2,09E+02
Fugacidade, Pa	2,17E+02	Fugacidade, Pa	1,86E+02
Concentração no ar, mol/m3	8,77E-02	Concentração no ar, mol/m3	7,49E-02
Massa contaminante ao fim de 7 dias	1,19E-03	Massa contaminante ao fim de 7 dias	1,45E-03
Fugacidade inicial no 8º dia, Pa	2,13E+02	Fugacidade inicial no 8º dia, Pa	1,83E+02
Fugacidade, Pa	1,85E+02	Fugacidade, Pa	1,62E+02
Concentração no ar, mol/m3	7,44E-02	Concentração no ar, mol/m3	6,53E-02
Massa contaminante ao fim de 8 dias	1,01E-03	Massa contaminante ao fim de 8 dias	1,26E-03
Fugacidade inicial no 9º dia, Pa	1,81E+02	Fugacidade inicial no 9º dia, Pa	1,59E+02
Fugacidade, Pa	1,57E+02	Fugacidade, Pa	1,41E+02
Concentração no ar, mol/m3	6,32E-02	Concentração no ar, mol/m3	5,70E-02
Massa contaminante ao fim de 9 dias	8,61E-04	Massa contaminante ao fim de 9 dias	1,10E-03
Fugacidade inicial no 10º dia, Pa	1,53E+02	Fugacidade inicial no 10º dia, Pa	1,39E+02
Fugacidade, Pa	1,33E+02	Fugacidade, Pa	1,23E+02
Concentração no ar, mol/m3	5,36E-02	Concentração no ar, mol/m3	4,97E-02
Massa contaminante ao fim de 10 dias	7,30E-04	Massa contaminante ao fim de 10 dias	9,63E-04
Fugacidade inicial no 11º dia, Pa	1,30E+02	Fugacidade inicial no 11º dia, Pa	1,21E+02
Fugacidade, Pa	1,13E+02	Fugacidade, Pa	1,08E+02
Concentração no ar, mol/m3	4,55E-02	Concentração no ar, mol/m3	4,34E-02
Massa contaminante ao fim de 11 dias	6,20E-04	Massa contaminante ao fim de 11 dias	8,40E-04
		Fugacidade inicial no 12º dia, Pa	1,06E+02
		Fugacidade, Pa	9,38E+01
		Concentração no ar, mol/m3	3,78E-02
		Massa contaminante ao fim de 12 dias	7,33E-04

**Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado
Xisto com Xileno (BVbXT_X), continuação**

Fugacidade inicial no 13º dia, Pa	9,24E+01
Fugacidade, Pa	8,19E+01
Concentração no ar, mol/m ³	3,30E-02
Massa contaminante ao fim de 13 dias	6,39E-04
Fugacidade inicial no 14º dia, Pa	8,06E+01
Fugacidade, Pa	7,14E+01
Concentração no ar, mol/m ³	2,88E-02
Massa contaminante ao fim de 14 dias	5,58E-04

**Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado
Xisto com BTEoX (BVbXT_BTEoX)**

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	8,31E+02
Fugacidade, Pa	7,58E+02
Concentração no ar, mol/m ³	3,06E-01
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	3,72E-03
Fugacidade inicial no 2º dia, Pa	7,40E+02
Fugacidade, Pa	6,75E+02
Concentração no ar, mol/m ³	2,72E-01
Massa contaminante ao fim de 2 dias	3,31E-03
Fugacidade inicial no 3º dia, Pa	6,58E+02
Fugacidade, Pa	6,00E+02
Concentração no ar, mol/m ³	2,42E-01
Massa contaminante ao fim de 3 dias	2,95E-03
Fugacidade inicial no 4º dia, Pa	5,86E+02
Fugacidade, Pa	5,34E+02
Concentração no ar, mol/m ³	2,16E-01
Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,62E-03
Fugacidade inicial no 5º dia, Pa	5,21E+02
Fugacidade, Pa	4,75E+02
Concentração no ar, mol/m ³	1,92E-01
Massa contaminante ao fim de 5 dias	2,33E-03
Fugacidade inicial no 6º dia, Pa	4,64E+02
Fugacidade, Pa	4,23E+02
Concentração no ar, mol/m ³	1,71E-01
Massa contaminante ao fim de 6 dias	2,08E-03
Fugacidade inicial no 7º dia, Pa	4,13E+02
Fugacidade, Pa	3,76E+02
Concentração no ar, mol/m ³	1,52E-01
Massa contaminante ao fim de 7 dias	1,85E-03
Fugacidade inicial no 8º dia, Pa	3,67E+02
Fugacidade, Pa	3,35E+02
Concentração no ar, mol/m ³	1,35E-01
Massa contaminante ao fim de 8 dias	1,64E-03

Ensaio de Bio-ventilação Não Inoculado

Xisto com BTEoX (BVbXT_BTEoX), continuação

Fugacidade inicial no 9º dia, Pa	3,27E+02
Fugacidade, Pa	2,98E+02
Concentração no ar, mol/m ³	1,20E-01
Massa contaminante ao fim de 9 dias	1,46E-03
Fugacidade inicial no 10º dia, Pa	2,91E+02
Fugacidade, Pa	2,65E+02
Concentração no ar, mol/m ³	1,07E-01
Massa contaminante ao fim de 10 dias	1,30E-03
Fugacidade inicial no 11º dia, Pa	2,59E+02
Fugacidade, Pa	2,36E+02
Concentração no ar, mol/m ³	9,52E-02
Massa contaminante ao fim de 11 dias	1,16E-03
Fugacidade inicial no 12º dia, Pa	2,30E+02
Fugacidade, Pa	2,10E+02
Concentração no ar, mol/m ³	8,48E-02
Massa contaminante ao fim de 12 dias	1,03E-03
Fugacidade inicial no 13º dia, Pa	2,05E+02
Fugacidade, Pa	1,87E+02
Concentração no ar, mol/m ³	7,54E-02
Massa contaminante ao fim de 13 dias	9,18E-04
Fugacidade inicial no 14º dia, Pa	1,82E+02
Fugacidade, Pa	1,66E+02
Concentração no ar, mol/m ³	6,71E-02
Massa contaminante ao fim de 14 dias	8,17E-04

Ensaio de Bio-ventilação Inoculado - Xisto com Benzeno (BVXT_B)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	1,97E+03	Fugacidade Inicial 4º dia	1,93E-01
Fugacidade, Pa	4,14E+02	Fugacidade, Pa	4,06E-02
Concentração no ar, mol/m3	1,67E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,64E-05
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	2,36E-04	Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,31E-08
Fugacidade Inicial 2º dia, Pa	9,09E+01	Fugacidade Inicial 5º dia	8,90E-03
Fugacidade, Pa	1,91E+01	Fugacidade, Pa	1,87E-03
Concentração no ar, mol/m3	7,70E-03	Concentração no ar, mol/m3	7,54E-07
Massa contaminante ao fim de 2 dias	1,09E-05	Massa contaminante ao fim de 5 dias	1,07E-09
Fugacidade Inicial 3º dia, Pa	4,19E+00	Fugacidade Inicial 6º dia	4,10E-04
Fugacidade, Pa	8,80E-01	Fugacidade, Pa	8,62E-05
Concentração no ar, mol/m3	3,55E-04	Concentração no ar, mol/m3	3,48E-08
Massa contaminante ao fim de 3 dias	5,02E-07	Massa contaminante ao fim de 6 dias	4,92E-11
		Total de contaminante bio-degradado, mol	0,0051

Ensaio de Bio-ventilação Inoculado - Xisto com Tolueno (BVXT_T)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	1,10E+03
Fugacidade, Pa	5,51E+02
Concentração no ar, mol/m3	2,22E-01
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	2,03E-03
Fugacidade Inicial 2º dia, Pa	5,13E+02
Fugacidade, Pa	2,58E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,04E-01
Massa contaminante ao fim de 2 dias	9,50E-04
Fugacidade Inicial 3º dia, Pa	2,40E+02
Fugacidade, Pa	1,21E+02
Concentração no ar, mol/m3	4,87E-02
Massa contaminante ao fim de 3 dias	4,45E-04
Fugacidade Inicial 4º dia	1,12E+02
Fugacidade, Pa	5,64E+01
Concentração no ar, mol/m3	2,28E-02
Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,08E-04
Fugacidade Inicial 5º dia	5,25E+01
Fugacidade, Pa	2,64E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,07E-02
Massa contaminante ao fim de 5 dias	9,74E-05
Fugacidade Inicial 6º dia	2,46E+01
Fugacidade, Pa	1,24E+01
Concentração no ar, mol/m3	4,99E-03
Massa contaminante ao fim de 6 dias	4,56E-05
Fugacidade Inicial 7º dia, Pa	1,15E+01
Fugacidade, Pa	5,78E+00
Concentração no ar, mol/m3	2,33E-03
Massa contaminante ao fim de 7 dias	2,13E-05

Total de contaminante bio-degradado, mol 0,0042

Ensaio de Bio-ventilação Inoculado - Xisto com Etilbenzeno (BVXT_E)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	6,71E+02
Fugacidade, Pa	3,80E+02
Concentração no ar, mol/m3	1,53E-01
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	2,04E-03
Fugacidade Inicial 2º dia, Pa	3,64E+02
Fugacidade, Pa	2,06E+02
Concentração no ar, mol/m3	8,32E-02
Massa contaminante ao fim de 2 dias	1,11E-03
Fugacidade Inicial 3º dia, Pa	1,98E+02
Fugacidade, Pa	1,12E+02
Concentração no ar, mol/m3	4,52E-02
Massa contaminante ao fim de 3 dias	6,03E-04
Fugacidade Inicial 4º dia	1,07E+02
Fugacidade, Pa	6,08E+01
Concentração no ar, mol/m3	2,45E-02
Massa contaminante ao fim de 4 dias	3,27E-04
Fugacidade Inicial 5º dia	5,82E+01
Fugacidade, Pa	3,30E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,33E-02
Massa contaminante ao fim de 5 dias	1,78E-04
Fugacidade Inicial 6º dia	3,16E+01
Fugacidade, Pa	1,79E+01
Concentração no ar, mol/m3	7,23E-03
Massa contaminante ao fim de 6 dias	9,64E-05
Fugacidade Inicial 7º dia, Pa	1,72E+01
Fugacidade, Pa	9,72E+00
Concentração no ar, mol/m3	3,92E-03
Massa contaminante ao fim de 7 dias	5,23E-05

Total de contaminante bio-degradado, mol 0,0036

Ensaio de Bio-ventilação Inoculado - Xisto com Xileno (BVXT_X)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	4,75E+02	Fugacidade Inicial 8º dia, Pa	7,77E+01
Fugacidade, Pa	3,73E+02	Fugacidade, Pa	6,10E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,50E-01	Concentração no ar, mol/m3	2,46E-02
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	2,91E-03	Massa contaminante ao fim de 8 dias	4,76E-04
Fugacidade Inicial 2º dia, Pa	3,67E+02	Fugacidade Inicial 9º dia, Pa	6,00E+01
Fugacidade, Pa	2,88E+02	Fugacidade, Pa	4,71E+01
Concentração no ar, mol/m3	1,16E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,90E-02
Massa contaminante ao fim de 2 dias	2,25E-03	Massa contaminante ao fim de 9 dias	3,68E-04
Fugacidade Inicial 3º dia, Pa	2,83E+02	Fugacidade Inicial 10º dia, Pa	4,64E+01
Fugacidade, Pa	2,22E+02	Fugacidade, Pa	3,64E+01
Concentração no ar, mol/m3	8,97E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,47E-02
Massa contaminante ao fim de 3 dias	1,73E-03	Massa contaminante ao fim de 10 dias	2,84E-04
Fugacidade Inicial 4º dia	2,19E+02	Fugacidade Inicial 11º dia, Pa	3,58E+01
Fugacidade, Pa	1,72E+02	Fugacidade, Pa	2,81E+01
Concentração no ar, mol/m3	6,93E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,13E-02
Massa contaminante ao fim de 4 dias	1,34E-03	Massa contaminante ao fim de 11 dias	2,19E-04
Fugacidade Inicial 5º dia	1,69E+02	Fugacidade Inicial 12º dia, Pa	2,76E+01
Fugacidade, Pa	1,33E+02	Fugacidade, Pa	2,17E+01
Concentração no ar, mol/m3	5,35E-02	Concentração no ar, mol/m3	8,75E-03
Massa contaminante ao fim de 5 dias	1,03E-03	Massa contaminante ao fim de 12 dias	1,69E-04
Fugacidade Inicial 6º dia	1,30E+02	Fugacidade Inicial 13º dia, Pa	2,13E+01
Fugacidade, Pa	1,02E+02	Fugacidade, Pa	1,68E+01
Concentração no ar, mol/m3	4,13E-02	Concentração no ar, mol/m3	6,76E-03
Massa contaminante ao fim de 6 dias	7,99E-04	Massa contaminante ao fim de 13 dias	1,31E-04
Fugacidade Inicial 7º dia, Pa	1,01E+02	Fugacidade Inicial 14º dia, Pa	1,65E+01
Fugacidade, Pa	7,90E+01	Fugacidade, Pa	1,29E+01
Concentração no ar, mol/m3	3,19E-02	Concentração no ar, mol/m3	5,22E-03
Massa contaminante ao fim de 7 dias	6,17E-04	Massa contaminante ao fim de 14 dias	1,01E-04
Total de contaminante bio-degradado, mol			0,0035

Ensaio de Bio-ventilação Inoculado - Xisto com BTEoX (BVXT_BTEoX)

Fugacidade inicial equilíbrio, Pa	8,31E+02	Fugacidade Inicial 8º dia, Pa	5,22E+00
Fugacidade, Pa	4,28E+02	Fugacidade, Pa	2,69E+00
Concentração no ar, mol/m3	1,73E-01	Concentração no ar, mol/m3	1,08E-03
Massa contaminante ao fim de 1 dia, mol	2,03E-03	Massa contaminante ao fim de 8 dias	1,27E-05
Fugacidade Inicial 2º dia, Pa	4,03E+02	Fugacidade Inicial 9º dia, Pa	2,53E+00
Fugacidade, Pa	2,07E+02	Fugacidade, Pa	1,30E+00
Concentração no ar, mol/m3	8,37E-02	Concentração no ar, mol/m3	5,25E-04
Massa contaminante ao fim de 2 dias	9,82E-04	Massa contaminante ao fim de 9 dias	6,17E-06
Fugacidade Inicial 3º dia, Pa	1,95E+02	Fugacidade Inicial 10º dia, Pa	1,23E+00
Fugacidade, Pa	1,01E+02	Fugacidade, Pa	6,31E-01
Concentração no ar, mol/m3	4,05E-02	Concentração no ar, mol/m3	2,55E-04
Massa contaminante ao fim de 3 dias	4,76E-04	Massa contaminante ao fim de 10 dias	2,99E-06
Fugacidade Inicial 4º dia	9,46E+01	Fugacidade Inicial 11º dia, Pa	5,94E-01
Fugacidade, Pa	4,87E+01	Fugacidade, Pa	3,06E-01
Concentração no ar, mol/m3	1,97E-02	Concentração no ar, mol/m3	1,23E-04
Massa contaminante ao fim de 4 dias	2,31E-04	Massa contaminante ao fim de 11 dias	1,45E-06
Fugacidade Inicial 5º dia	4,59E+01	Fugacidade Inicial 12º dia, Pa	2,88E-01
Fugacidade, Pa	2,36E+01	Fugacidade, Pa	1,48E-01
Concentração no ar, mol/m3	9,52E-03	Concentração no ar, mol/m3	5,98E-05
Massa contaminante ao fim de 5 dias	1,12E-04	Massa contaminante ao fim de 12 dias	7,02E-07
Fugacidade Inicial 6º dia	2,22E+01	Fugacidade Inicial 13º dia, Pa	1,40E-01
Fugacidade, Pa	1,14E+01	Fugacidade, Pa	7,18E-02
Concentração no ar, mol/m3	4,62E-03	Concentração no ar, mol/m3	2,90E-05
Massa contaminante ao fim de 6 dias	5,42E-05	Massa contaminante ao fim de 13 dias	3,40E-07
Fugacidade Inicial 7º dia, Pa	1,08E+01	Fugacidade Inicial 14º dia, Pa	6,76E-02
Fugacidade, Pa	5,54E+00	Fugacidade, Pa	3,48E-02
Concentração no ar, mol/m3	2,24E-03	Concentração no ar, mol/m3	1,40E-05
Massa contaminante ao fim de 7 dias	2,63E-05	Massa contaminante ao fim de 14 dias	1,65E-07
Total de contaminante bio-degradado, mol			0,0041

BVbCL_B				BVbCL_T				BVbCL_E			
Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	Δ Cgas	Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	Δ Cgas	Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	Δ Cgas
(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)		(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)		(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	
0,00	90,34			0,00	60,76			0,00	31,68		
1,00	87,38			1,00	41,98			1,00	27,60		
2,00	65,49			2,00	38,13			2,00	26,88		
3,00	56,21	57,43	1,22	3,00	34,99	34,65	0,34	3,00	20,15	23,41	3,26
4,00	53,54	51,51	2,03	4,00	34,43	27,21	7,22	4,00	16,47	15,61	0,86
5,00	42,15	44,20	2,05	5,00	30,63	24,54	6,09	5,00	14,19	13,91	0,28
6,00	42,00	37,94	4,06	6,00	28,20	22,13	6,07	6,00	13,39	12,39	1,00
7,00	32,46	32,55	0,09	7,00	24,56	19,96	4,60	7,00	13,59	11,03	2,56
8,00	25,86	27,94	2,08	8,00	21,49	18,01	3,48	8,00	12,18	9,82	2,36
9,00	19,38	23,98	4,60	9,00	16,32	16,24	0,08	9,00	9,99	8,75	1,24
10,00	18,75	20,58	1,83	10,00	17,27	14,65	2,62	10,00	9,62	7,79	1,83
11,00	17,96	17,66	0,30								
		Erro Relativo	0,06			Erro Relativo	0,15			Erro Relativo	0,12

BVbCL_X				BVbCL_BTEoX			
Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	Δ Cgas	Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	Δ Cgas
(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)		(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	
0,00	28,06			0,00	73,20		
1,00	25,61			1,00	56,17		
2,00	22,80			2,00	35,20		
3,00	18,26	16,32	1,94	3,00	33,87	26,60	7,27
4,00	19,00	11,66	7,34	4,00	32,36	20,01	12,35
5,00	19,14	11,18	7,96	5,00	20,57	18,07	2,50
6,00	18,47	10,72	7,75	6,00	21,88	16,31	5,57
7,00	15,96	10,27	5,69	7,00	23,19	14,73	8,46
8,00	14,26	9,85	4,41	8,00	18,72	13,30	5,42
9,00	11,22	9,45	1,77	9,00	20,07	12,01	8,06
10,00	11,95	9,06	2,89	10,00	9,21	10,84	1,63
11,00	12,04	8,68	3,36	11,00	8,32	9,79	1,47
				12,00	5,37	8,84	3,47
				13,00	4,31	7,98	3,67
				14,00	6,33	7,20	0,87
				15,00	4,72	6,51	1,79
		Erro Relativo	0,31			Erro Relativo	0,30

BVbSR_B				BVbSR_T				BVbSR_E			
Tempo (dias)	Cgas Exp (mg L ⁻¹)	Cgas Calc (mg L ⁻¹)	Δ Cgas	Tempo (dias)	Cgas Exp (mg L ⁻¹)	Cgas Calc (mg L ⁻¹)	Δ Cgas	Tempo (dias)	Cgas Exp (mg L ⁻¹)	Cgas Calc (mg L ⁻¹)	Δ Cgas
0,00	88,79			0,00	68,81			0,00	31,76		
1,00	82,68			1,00	56,54			1,00	32,82		
2,00	70,65			2,00	52,61			2,00	30,36		
3,00	53,41	51,16	2,25	3,00	48,91			3,00	25,79		
4,00	50,94	48,19	2,75	4,00	34,71	32,38	2,33	4,00	21,53	22,40	5,64
5,00	42,50	43,66	1,16	5,00	32,94	26,23	6,71	5,00	19,89	15,89	4,00
6,00	41,07	39,54	1,53	6,00	33,03	24,45	8,58	6,00	18,93	15,06	4,65
7,00	34,95	35,82	0,87	7,00	25,51	22,79	2,72	7,00	20,21	14,28	6,67
8,00	27,09	32,44	5,35	8,00	21,60	21,25	0,35	8,00	11,87	13,54	0,96
9,00	24,03	29,39	5,36	9,00	20,52	19,81	0,71	9,00	12,91	12,83	0,75
10,00	21,77	26,62	4,85	10,00	19,53	18,47	1,06	10,00	13,67	12,16	2,14
11,00	22,66	24,11	1,45	11,00	18,37	17,22	1,15	11,00	12,01	11,53	1,08
12,00	20,83	21,84	1,01	12,00	19,35	16,05	3,30	12,00	12,27	10,93	1,91
13,00	18,86	19,78	0,92	13,00	14,76	14,96	0,20	13,00	9,79	10,36	0,03
14,00	16,85	17,92	1,07	14,00	16,06	13,95	2,11	14,00	11,31	9,82	2,00
15,00	19,99	16,23	3,76	15,00	15,88	13,00	2,88	15,00	11,33	9,31	11,33
16,00	17,92	14,70	3,22								
17,00	16,04	13,32	2,72								
18,00	15,99	12,06	3,93								
Erro Relativo			0,09	Erro Relativo			0,12	Erro Relativo			0,23

BVbSR_X				BVbSR_BTEoX			
Tempo (dias)	Cgas Exp (mg L ⁻¹)	Cgas Calc (mg L ⁻¹)	Δ Cgas	Tempo (dias)	Cgas Exp (mg L ⁻¹)	Cgas Calc (mg L ⁻¹)	Δ Cgas
0,00	25,63			0,00	55,10		
1,00	24,54			1,00	49,09		
2,00	24,08			2,00	53,60		
3,00	21,91			3,00	42,83		
4,00	23,19			4,00	35,08		
5,00	19,77			5,00	27,33	25,08	2,25
6,00	17,96	15,54	2,42	6,00	25,69	19,66	6,03
7,00	12,89	11,15	1,74	7,00	25,65	18,52	7,13
8,00	14,47	10,74	3,73	8,00	22,05	17,44	4,61
9,00	13,96	10,35	3,61	9,00	18,55	16,42	2,13
10,00	9,01	9,97	0,96	10,00	17,67	15,47	2,20
11,00	12,04	9,61	2,43	11,00	15,93	14,57	1,36
12,00	12,62	9,26	3,36	12,00	13,40	13,72	0,32
13,00	11,17	8,92	2,25	13,00	12,60	12,92	0,32
14,00	8,94	8,60	0,34	14,00	13,53	12,17	1,36
15,00	8,97	8,29	0,68			Erro Relativo	0,14
16,00	9,00	7,99	1,01				
17,00	9,99	7,69	2,30				
18,00	9,63	7,41	2,22				
19,00	9,27	7,14	2,13				
20,00	8,59	6,88	1,71				
21,00	9,38	6,63	2,75				
22,00	9,01	6,39	2,62				
23,00	9,41	6,16	3,25				
24,00	8,03	5,94	2,09				
25,00	7,63	5,72	1,91				
26,00	8,19	5,51	2,68				
27,00	7,51	5,31	2,20				
		Erro Relativo	0,21				

BVbXT_B				BVbXT_T				BVbXT_E			
Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	Δ Cgas	Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	Δ Cgas	Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	Δ Cgas
(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)		(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)		(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	
0,00	119,83			0,00	76,91			0,00	48,40	28,73	19,67
1,00	98,20			1,00	55,78			1,00	18,39	18,34	0,05
2,00	61,55	62,11	0,56	2,00	50,29			2,00	15,23	15,56	0,33
3,00	56,52	56,55	0,03	3,00	38,78	40,73	1,95	3,00	10,37	13,21	2,84
4,00	42,81	49,08	6,27	4,00	31,21	32,13	0,92	4,00	10,94	11,21	0,27
5,00	38,01	42,59	4,58	5,00	32,90	28,99	3,91	5,00	9,60	9,51	0,09
6,00	35,35	36,96	1,61	6,00	24,28	26,15	1,87	6,00	8,65	8,07	0,58
7,00	33,10	32,08	1,02	7,00	22,54	23,59	1,05	7,00	8,00	6,85	1,15
8,00	27,91	27,84	0,07	8,00	17,74	21,28	3,54	8,00	6,86	5,82	1,04
9,00	24,66	24,16	0,50	9,00	14,36	19,20	4,84	9,00	7,11	4,94	2,17
10,00	23,25	20,97	2,28	10,00	17,69	17,32	0,37	10,00	7,11	4,19	2,92
11,00	25,10	18,20	6,90	11,00	15,05	15,62	0,57	11,00	8,32	4,07	4,25
	Erro Relativo		0,06		Erro Relativo		0,09		Erro Relativo		0,21

BVbXT_X				BVbXT_BTEoX			
Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	Δ Cgas	Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	Δ Cgas
(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)		(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	
0,00	41,60			0,00	72,77		
1,00	19,28	20,34	1,06	1,00	64,87		
2,00	16,58	13,26	3,32	2,00	55,87		
3,00	14,15	11,57	2,58	3,00	40,31		
4,00	11,18	10,10	1,08	4,00	41,29		
5,00	10,48	8,81	1,67	5,00	38,06	32,08	5,98
6,00	8,02	7,68	0,34	6,00	34,83	23,89	10,94
7,00	8,89	6,70	2,19	7,00	30,00	21,26	8,74
8,00	6,16	5,85	0,31	8,00	29,89	18,92	10,97
9,00	6,43	5,10	1,33	9,00	24,55	16,84	7,71
10,00	7,76	4,45	3,31	10,00	17,92	14,98	2,94
11,00	8,35	3,88	4,47	11,00	12,88	13,33	0,45
12,00	8,93	3,39	5,54	12,00	6,03	11,86	5,83
13,00	7,43	2,96	4,47	13,00	6,00	10,56	4,56
14,00	7,38	2,58	4,80	14,00	5,84	9,40	3,56
	Erro Relativo		0,26		Erro Relativo		0,30

BVCL_B				BVCL_T				BVCL_E			
Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	ΔCgas	Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	ΔCgas	Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	ΔCgas
(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)		(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)		(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	
0,00	89,38			0,00	61,33			0,00	32,72		
1,00	61,55			1,00	39,61			1,00	30,32		
2,00	63,98			2,00	39,78	34,65	5,13	2,00	23,61	23,41	0,20
3,00	49,97	57,43	7,46	3,00	24,85	19,11	5,74	3,00	7,75	7,86	0,11
4,00	42,31	42,97	0,66	4,00	12,77	12,01	0,76	4,00	4,04	3,31	0,73
5,00	34,55	30,69	3,86	5,00	2,52	7,54	5,02	5,00	1,35	1,39	0,04
6,00	22,99	21,91	1,08	6,00	0,20	4,74	4,54	6,00	1,38	0,59	0,79
7,00	9,54	15,65	6,11	7,00	0,82	2,98	2,16	7,00	0,64	0,25	0,39
8,00	0,55	11,18	10,63	8,00	0,11	1,87	1,76	8,00	0,10	0,10	0,00
9,00	0,21	7,98	7,77	9,00	0,12	1,17	1,05	9,00	0,07	0,04	0,03
10,00	0,10	5,70	5,60	10,00	0,09	0,74	0,65	10,00	0,07	0,02	0,05
11,00	0,11	4,07	3,96					11,00	0,11	0,01	0,10
		Erro Relativo	0,29			Erro Relativo	0,33			Erro Relativo	0,06

BVCL_X				BVCL_BTEoX			
Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	Δ Cgas	Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	Δ Cgas
(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)		(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	
0,00	26,78			0,00	80,71		
1,00	24,69			1,00	51,47		
2,00	20,66	16,32	4,34	2,00	34,93	26,60	8,33
3,00	6,92	6,46	0,46	3,00	8,19	6,90	1,29
4,00	4,84	3,34	1,50	4,00	5,24	1,64	3,60
5,00	3,30	1,73	1,57	5,00	4,84	0,39	4,45
6,00	1,18	0,89	0,29	6,00	3,50	0,09	3,41
7,00	0,90	0,46	0,44	7,00	2,17	0,02	2,15
8,00	0,64	0,24	0,40	8,00	2,05	0,01	2,04
9,00	0,50	0,12	0,38	9,00	0,40	0,00	0,40
10,00	0,45	0,06	0,39	10,00	0,95	0,00	0,95
11,00	0,34	0,03	0,31	11,00	0,44	0,00	0,44
		Erro Relativo	0,25	12,00	0,71	12,00	0,71
				13,00	0,12	0,00	0,12
				14,00	0,2	0,00	0,18
				15,00	0,2	0,00	0,21
						Erro Relativo	0,25

BVSR_B						
Tempo	Cgas Exp1	Cgas Exp2	Cgas Calc1	Cgas Calc2	Δ Cgas1	Δ Cgas2
(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)			
0,00	106,36	66,33				
1,00	88,88	85,63				
2,00	68,63	67,34				
3,00	58,32	63,09	51,16		7,16	
4,00	53,62	58,85	45,17		8,44	
5,00	39,79	54,06	38,35	51,16	1,44	2,90
6,00	26,72	49,58	32,55	46,31	5,83	3,27
7,00	26,50	36,33	27,63	40,31	1,13	3,98
8,00	22,39	30,41	23,46	35,08	1,07	4,67
9,00	18,93	28,72	19,91	30,53	0,98	1,81
10,00	15,36	25,24	16,90	26,58	1,55	1,34
11,00	14,28	21,76	14,35	23,13	0,06	1,37
12,00	12,70	15,07	12,18	20,13	0,53	5,06
13,00	10,25	12,22	10,34	17,52	0,08	5,30
14,00	5,74	11,80	8,78	15,25	3,04	3,45
15,00	1,74	11,38	7,45	13,27	5,71	1,89
16,00	0,47	8,73	6,32	11,55	5,85	2,82
17,00	0,25	7,65	5,37	10,05	5,11	2,40
18,00	0,22	6,30	4,56	8,75	4,34	2,45
19,00		1,23		7,62		6,39
20,00		0,09		6,63		6,54
21,00		0,09		5,77		5,68
22,00		0,09		5,02		4,93
			Erro Relativo		0,17	0,21

BVSR_T						
Tempo	Cgas Exp1	Cgas Exp2	Cgas Calc1	Cgas Calc2	Δ Cgas1	Δ Cgas2
(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)			
0,00	59,84	64,69				
1,00	50,92	45,75				
2,00	40,80	32,22		32,38		0,16
3,00	32,63	30,70	32,38	24,49	0,25	6,21
4,00	26,67	29,17	22,70	21,32	3,97	7,85
5,00	22,95	24,83	18,31	18,56	4,65	6,27
6,00	15,44	20,25	14,76	16,16	0,68	4,09
7,00	14,10	16,92	11,91	14,07	2,20	2,85
8,00	8,95	14,46	9,60	12,24	0,65	2,22
9,00	3,72	11,26	7,74	10,66	4,02	0,60
10,00	0,94	9,77	6,24	9,28	5,30	0,49
11,00	1,17	8,28	5,04	8,08	3,87	0,20
12,00	0,72	4,59	4,06	7,03	3,34	2,44
13,00	0,35	1,74	3,27	6,12	2,92	4,38
14,00	0,32	1,29	2,64	5,33	2,32	4,04
15,00	0,17	0,83	2,13	4,64	1,95	3,81
16,00		1,13		4,04		2,91
17,00		1,07		3,52		2,45
18,00		0,97		3,06		2,09
19,00		0,17		2,66		2,49
20,00		0,18		2,32		2,14
21,00		0,12		2,02		1,90
22,00		0,10		1,76		1,66
			Erro Relativo		0,28	0,29

BVSR_E						
Tempo	Cgas Exp1	Cgas Exp2	Cgas Calc1	Cgas Calc2	Δ Cgas1	Δ Cgas2
(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)			
0,00	31,23	36,03				
1,00	21,27	23,29	22,40	22,40	1,13	0,89
2,00	18,01	14,55	14,40	14,59	3,61	0,04
3,00	14,97	12,92	12,36	12,70	2,60	0,22
4,00	13,23	11,48	10,62	11,06	2,61	0,42
5,00	10,70	10,51	9,12	9,63	1,58	0,88
6,00	9,77	9,45	7,83	8,38	1,94	1,07
7,00	9,44	8,40	6,72	7,29	2,72	1,11
8,00	6,65	10,23	5,77	6,35	0,87	3,88
9,00	4,26	8,75	4,96	5,53	0,70	3,22
10,00	1,69	7,46	4,26	4,81	2,57	2,65
11,00	1,71	6,41	3,66	4,19	1,95	2,22
12,00	0,80	5,66	3,14	3,65	2,34	2,01
13,00	0,40	6,77	2,70	3,17	2,30	3,60
14,00	0,21	3,42	2,32	2,76	2,11	0,66
15,00	0,32	3,33	1,99	2,41	1,67	0,92
16,00		2,81		2,09		0,72
17,00		1,63		1,82		0,19
18,00		1,38		1,59		0,21
19,00		1,07		1,38		0,31
20,00		0,80		1,20		0,40
21,00		0,33		1,05		0,72
22,00		0,43		0,91		0,48
23,00		0,19		0,79		0,60
			Erro Relativo		0,27	0,18

BVSR_X

Tempo	Cgas Exp1	Cgas Exp2	Cgas Calc1	Cgas Calc2	Δ Cgas1	Δ Cgas2
(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)			
0,00	26,60	58,25				
1,00	20,80	31,51				
2,00	14,64	28,33	15,54			
3,00	13,99	21,09	10,46			
4,00	11,18	18,38	9,45	15,54	1,73	2,84
5,00	9,66	13,72	8,54	9,54	1,12	4,18
6,00	8,38	13,38	7,72	7,86	0,66	5,52
7,00	7,89	9,97	6,97	6,48	0,92	3,49
8,00	7,35	6,68	6,30	5,34	1,05	1,34
9,00	7,17	3,99	5,69	4,40	1,48	0,41
10,00	6,63	2,92	5,15	3,63	1,48	0,71
11,00	5,28	2,27	4,65	2,99	0,63	0,72
12,00	4,58	2,14	4,20	2,46	0,37	0,32
13,00	3,80	1,94	3,80	2,03	0,01	0,09
14,00	3,50	1,82	3,43	1,67	0,07	0,15
15,00	3,04	1,92	3,10	1,38	0,06	0,54
16,00	1,92	1,41	2,80	1,14	0,88	0,27
17,00	2,12	1,35	2,53	0,94	0,41	0,41
18,00	1,60	1,29	2,29	0,77	0,69	0,52
19,00	1,26	1,49	2,07	0,64	0,81	0,85
20,00	1,15	1,22	1,87	0,52	0,72	0,70
21,00	0,96	0,95	1,69	0,43	0,73	0,52
22,00	0,87	0,98	1,53	0,36	0,65	0,62
23,00	0,81	0,68	1,38	0,29	0,57	0,39
24,00	0,57	0,68	1,25	0,24	0,68	0,44
25,00	0,49	0,63	1,13	0,20	0,63	0,43
26,00	0,45	0,68	1,02	0,16	0,57	0,52
27,00	0,50	0,50	0,92	0,14	0,42	0,36
28,00		0,40		0,09		0,31
Erro Relativo					0,19	0,29

BVSR_BTEoX

Tempo	Cgas Exp1	Cgas Calc	Δ Cgas	Tempo	Cgas Exp1	Cgas Calc	Δ Cgas
(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)		(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	
0,00	71,30			8,00	12,02	8,70	3,32
1,00	48,89			9,00	10,15	6,99	3,16
2,00	39,64			10,00	2,62	5,62	3,00
3,00	32,52			11,00	1,16	4,51	3,35
4,00	39,31	25,08	14,23	12,00	0,26	3,63	3,37
5,00	33,32	16,78	16,54	13,00	0,22	2,91	2,69
6,00	27,32	13,48	13,84	14,00	0,18	2,34	2,16
7,00	15,82	10,83	4,99	Erro Relativo			0,50

BVXT_B				BVXT_T				BVXT_E			
Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	Δ Cgas	Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	Δ Cgas	Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	Δ Cgas
(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)		(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)		(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	
0,00	118,51			0,00	71,00			0,00	42,47		
1,00	95,62			1,00	45,81			1,00	29,62	28,73	0,89
2,00	54,78	62,11	7,34	2,00	48,99	40,73	8,26	2,00	19,76	11,98	7,79
3,00	5,34	13,05	7,71	3,00	25,96	17,36	8,60	3,00	6,06	6,50	0,44
4,00	0,45	0,60	0,15	4,00	2,20	8,12	5,93	4,00	0,85	3,53	2,68
5,00	0,35	0,03	0,32	5,00	0,36	3,80	3,44	5,00	0,41	1,92	1,51
6,00	0,24	0,00	0,24	6,00	0,34	1,78	1,44	6,00	0,38	1,04	0,66
7,00	0,24	0,00	0,24	7,00	0,33	0,83	0,50	7,00	0,27	0,56	0,29
Erro Relativo			0,26	Erro Relativo			0,36	Erro Relativo			0,25

BVXT_X				BVXT_BTEoX			
Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	Δ Cgas	Tempo	Cgas Exp	Cgas Calc	Δ Cgas
(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)		(dias)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	
0,00	41,00			0,00	73,48		
1,00	15,87	20,34	4,47	1,00	40,75		
2,00	13,80	11,75	2,05	2,00	37,20	32,08	5,12
3,00	11,16	9,07	2,09	3,00	16,89	13,49	3,40
4,00	7,00	7,01	0,00	4,00	5,12	6,54	1,42
5,00	3,93	5,41	1,48	5,00	4,60	3,17	1,43
6,00	2,35	4,18	1,83	6,00	4,08	1,54	2,54
7,00	1,25	3,23	1,97	7,00	1,54	0,74	0,80
8,00	0,88	2,49	1,61	8,00	1,18	0,36	0,82
9,00	0,56	1,92	1,36	9,00	2,25	0,17	2,08
10,00	0,61	1,49	0,87	10,00	1,16	0,08	1,08
11,00	0,53	1,15	0,62	11,00	1,40	0,04	1,36
12,00	0,46	0,89	0,42	12,00	0,11	0,02	0,09
13,00	0,44	0,68	0,25	13,00	0,13	0,01	0,12
14,00	0,33	0,53	0,20	14,00	0,13	0,00	0,13
Erro Relativo			0,32	Erro Relativo			0,27

Benzeno: $C_6H_6 + 7,5O_2 \rightarrow 6CO_2 + 3H_2O$

Tolueno: $C_7H_8 + 9O_2 \rightarrow 7CO_2 + 4H_2O$

Etilbenzeno: $C_8H_{10} + 10,5O_2 \rightarrow 8CO_2 + 5H_2O$

Xileno: $C_8H_{10} + 10,5O_2 \rightarrow 8CO_2 + 5H_2O$

BVCL_B

t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	89,38	20,9	825,34		0,46	24,98	
1,00	61,55	20,3	801,65	23,69	0,51	27,69	2,71
			803,97			27,43	
2,00	63,99	20,1	793,75	10,22	0,52	28,24	0,81
			796,85			27,92	
3,00	49,97	20,2	797,70	-0,85	0,47	25,52	-2,40
			800,41			25,47	
4,00	42,31	19,9	785,85	14,56	0,50	27,15	1,68
			789,73			26,94	
5,00	34,55	19,8	781,90	7,82	0,51	27,69	0,76
			786,16			27,43	
6,00	22,99	18,9	746,36	39,80	0,93	50,50	23,07
			754,11			48,00	
7,00	9,54	16,3	643,69	110,42	2,77	150,41	102,41
			661,50			138,11	
8,00	0,55	14,5	572,61	88,90	4,17	226,43	88,32
			597,39			206,67	
9,00	0,21	14,5	572,61	24,79	4,22	229,14	22,47
			597,39			209,12	
10,00	0,10	15,6	616,05	-18,65	3,76	204,16	-4,96
			636,57			186,59	
11,00	0,11	16,0	631,84	4,73	3,50	190,05	3,45
			Total de O ₂ consumido (mg)	305,42	Total de CO ₂ produzido (mg)		238,34

BVCL_T							
t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	61,33	20,9	825,34		0,46	24,98	
1,00	39,61	20,4	805,60	19,75	0,48	26,06	1,09
			807,53			25,96	
2,00	39,78	20,2	797,70	9,83	0,50	27,15	1,19
			800,41			26,94	
3,00	24,85	19,9	785,85	14,56	0,55	29,86	2,93
			789,73			29,39	
4,00	12,77	17,6	695,03	94,70	1,63	88,51	59,12
			707,81			82,28	
5,00	2,52	12,4	489,68	218,13	5,42	294,30	212,02
			522,60			267,89	
6,00	0,20	12,1	477,83	44,76	5,97	324,16	56,28
			511,91			294,82	
7,00	0,82	13,3	525,22	-13,31	5,52	299,73	4,91
			554,65			272,79	
8,00	0,11	14,0	552,86	1,79	5,15	279,64	6,85
			579,58			254,67	
9,00	0,12	14,3	564,71	14,87	4,92	267,15	12,49
			590,27			243,40	
10,00	0,09	14,7	580,50	9,76	4,30	233,49	-9,92
		Total de O2 consumido (mg)		414,85	Total de CO2 produzido (mg)		346,96

BVCL_E							
t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	32,72	20,9	825,34		0,46	24,98	
1,00	30,32	20,4	805,60	19,75	0,49	26,61	1,63
			807,53			26,45	
2,00	23,61	20,3	801,65	5,89	0,52	28,24	1,79
			803,97			27,92	
3,00	7,75	18,9	746,36	57,61	1,00	54,30	26,38
			754,11			51,42	
4,00	4,04	13,4	529,17	224,94	4,49	243,80	192,38
			558,21			222,34	
5,00	1,35	11,7	462,03	96,18	5,80	314,93	92,59
			497,66			286,50	
6,00	0,17	10,9	430,44	67,22	6,90	374,66	88,16
			469,17			340,37	
7,00	0,64	10,9	430,44	38,73	7,09	384,98	44,61
			469,17			349,67	
8,00	0,10	12,0	473,88	-4,71	6,43	349,14	-0,53
			508,35			317,35	
9,00	0,07	12,3	485,73	22,62	6,11	331,77	14,41
			519,03			301,68	
10,00	0,07	12,7	501,52	17,51	5,60	304,07	2,39
			Total de O2 consumido (mg)	545,72		Total de CO2 produzido (mg)	463,82

BVCL_X							
t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	26,78	20,9	825,34		0,46	24,98	
1,00	24,69	20,5	809,55	15,80	0,48	26,06	1,09
			811,10			25,96	
2,00	20,66	20,3	801,65	9,45	0,51	27,69	1,74
			803,97			27,43	
3,00	6,92	19,1	754,26	49,71	0,95	51,58	24,16
			761,23			48,97	
4,00	4,84	17,9	706,87	54,36	1,50	81,45	32,47
			718,49			75,91	
5,00	3,30	15,1	596,30	122,19	3,32	180,27	104,36
			618,76			165,04	
6,00	1,18	14,0	552,86	65,90	4,36	236,74	71,70
			579,58			215,98	
7,00	0,90	13,9	548,91	30,67	4,60	249,77	33,80
			576,02			227,73	
8,00	0,64	13,9	548,91	27,11	4,68	254,12	26,39
			576,02			231,65	
9,00	0,50	14,1	556,81	19,21	4,76	258,46	26,82
			583,14			235,57	
10,00	0,45	14,2	560,76	22,39	4,86	263,89	28,33
			586,71			240,46	
11,00	0,34	14,6	576,56	10,15	4,52	245,43	4,97
			Total de O2 consumido (mg)	426,93		Total de CO2 produzido (mg)	355,81

BVCL_BTEoX							
t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	80,71	21,0	829,29		0,34	18,46	
1,00	51,47	19,9	785,85	43,44	0,42	22,81	4,34
			790,11			22,38	
2,00	34,93	15,7	619,99	170,12	4,59	249,23	226,85
			640,52			226,60	
3,00	8,19	9,3	367,26	273,26	9,17	497,92	271,32
			412,57			450,90	
4,00	5,24	9,5	375,16	37,41	9,98	541,90	91,00
			419,69			490,57	
5,00	4,84	10,7	422,54	-2,85	7,40	401,81	-88,76
			462,43			364,22	
6,00	3,50	11,1	438,34	24,09	6,36	345,34	-18,88
			476,68			313,28	
7,00	2,17	11,5	454,14	22,54	5,71	310,05	-3,24
			490,93			281,45	
8,00	2,05	12,5	493,63	-2,70	5,40	293,21	11,76
			526,54			266,27	
9,00	0,40	13,4	529,17	-2,62	4,60	249,77	-16,49
			558,60			227,09	
10,00	0,95	14,4	568,66	-10,06	3,97	215,57	-11,52
			594,22			196,24	
11,00	0,44	15,2	600,25	-6,03	3,38	183,53	-12,71
			622,71			167,34	
12,00	0,71	15,8	623,94	-1,23	3,21	174,30	6,96
			644,08			159,02	
13,00	0,12	16,4	647,64	-3,56	2,9	157,47	-1,55
			665,45			143,83	
14,00	0,2	17,4	687,13	-21,68	2,29	124,34	-19,49
			701,07			113,96	
15,00	0,2	17,4	687,13	13,94	2,29	124,34	10,38
		Total de O2 consumido (mg)		534,08	Total de CO2 produzido (mg)		449,98

BVSR_B

t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	106,36	21,5	811,76		0,44	22,84	
1,00	88,88	20,7	781,56	30,21	0,93	48,28	25,44
			784,66			45,67	
2,00	68,63	20,5	774,01	10,65	1,16	60,22	14,55
			777,88			56,39	
3,00	58,32	20,5	774,01	3,87	1,28	66,45	10,06
			777,88			61,98	
4,00	53,62	20,5	774,01	3,87	1,28	66,45	4,47
			777,88			61,98	
5,00	39,79	20,6	777,78	0,10	1,26	65,41	3,43
			781,27			61,05	
6,00	26,72	20,7	781,56	-0,29	1,24	64,37	3,33
			784,66			60,11	
7,00	26,50	20,6	777,78	6,87	1,26	65,41	5,30
			781,27			61,05	
8,00	22,39	20,5	774,01	7,26	1,29	66,97	5,92
			777,88			62,44	
9,00	18,93	20,3	766,45	11,42	1,30	67,49	5,05
			771,10			62,91	
10,00	15,36	20,1	758,90	12,20	1,37	71,12	8,21
			764,33			66,17	
11,00	14,28	20,1	758,90	5,42	1,40	72,68	6,51
			764,33			67,57	
12,00	12,70	20,0	755,13	9,20	1,46	75,80	8,23
			760,94			70,36	
13,00	10,25	19,9	751,35	9,58	1,84	95,52	25,16
			757,55			88,07	
14,00	5,74	19,1	721,15	36,40	2,49	129,27	41,20
			730,44			118,35	
15,00	1,74	18,3	690,94	39,50	3,27	169,76	51,41
			703,33			154,69	
16,00	0,47	18,4	694,72	8,62	3,15	163,53	8,84
			706,72			149,10	
17,00	0,25	18,6	702,27	4,45	2,94	152,63	3,53
			713,50			139,32	
18,00	0,22	18,6	702,27	11,23	2,73	141,73	2,41
			Total de O ₂ consumido (mg)	199,34		Total de CO ₂ produzido (mg)	233,05

BVS2_B							
t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	66,33	21,0	792,88		0,32	16,61	
1,00	85,63	20,6	777,78	15,10	0,86	44,65	28,03
			781,27			42,41	
2,00	67,34	20,6	777,78	3,49	0,82	42,57	0,16
			781,27			40,55	
3,00	63,09	20,5	774,01	7,26	0,89	46,20	5,66
			777,88			43,81	
4,00	58,85	20,4	770,23	7,65	0,96	49,84	6,03
			774,49			47,07	
5,00	54,06	20,3	766,45	8,04	1,04	53,99	6,92
			771,10			50,80	
6,00	49,58	20,1	758,90	12,20	1,14	59,18	8,39
			764,33			55,46	
7,00	36,33	20,0	755,13	9,20	1,19	61,78	6,32
			760,94			57,79	
8,00	30,41	19,8	747,58	13,36	1,30	67,49	9,70
			754,16			62,91	
9,00	28,72	19,7	743,80	10,36	1,45	75,28	12,37
			750,77			69,90	
10,00	25,24	19,4	730,59	20,19	1,77	91,89	21,99
			738,91			84,81	
11,00	21,76	19,0	717,37	21,54	2,09	108,50	23,69
			727,05			99,72	
12,00	15,07	18,8	709,82	17,23	2,29	118,89	19,17
			720,28			109,03	
13,00	12,22	18,4	694,72	25,56	2,53	131,35	22,31
			706,72			120,22	
14,00	11,80	18,1	683,39	23,33	2,84	147,44	27,22
			696,56			134,66	
15,00	11,38	17,8	672,06	24,49	3,15	163,53	28,87
			686,39			149,10	
16,00	8,73	17,6	664,51	21,88	3,45	179,11	30,01
			679,62			163,08	
17,00	7,65	17,5	660,74	18,88	3,51	182,22	19,14
			676,23			165,87	
18,00	6,30	17,1	645,63	30,59	3,74	194,16	28,29
			662,67			176,59	
19,00	1,23	17,2	649,41	13,26	3,87	200,91	24,32
			666,06			182,65	
20,00	0,09	17,4	656,96	9,10	3,62	187,93	5,29
			672,84			171,00	
21,00	0,09	17,8	672,06	0,78	3,36	174,43	3,44
			686,39			158,89	
22,00	0,09	17,9	675,84	10,55	3,22	167,17	8,28
Total de O2 consumido (mg)				324,04	Total de CO2 produzido (mg)		345,61

BVSR_T							
t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	59,84	21,5	811,76		0,44	22,84	
1,00	50,92	21,0	792,88	18,88	0,74	38,42	15,57
			794,82			36,82	
2,00	40,80	20,9	789,11	5,71	0,83	43,09	6,27
			791,43			41,01	
3,00	32,63	20,8	785,33	6,10	1,01	52,43	11,42
			788,04			49,40	
4,00	26,67	20,6	777,78	10,26	1,27	65,93	16,53
			781,27			61,51	
5,00	22,95	20,5	774,01	7,26	1,34	69,57	8,05
			777,88			64,77	
6,00	15,44	20,4	770,23	7,65	1,50	77,87	13,10
			774,49			72,23	
7,00	14,10	19,7	743,80	30,69	2,15	111,62	39,39
			750,77			102,51	
8,00	8,95	18,8	709,82	40,95	2,91	151,07	48,56
			720,28			137,92	
9,00	3,72	16,6	626,76	93,52	4,69	243,48	105,56
			645,73			220,85	
10,00	0,94	16,2	611,65	34,08	4,92	255,42	34,57
			632,18			231,57	
11,00	1,17	16,4	619,20	12,97	4,87	252,83	21,26
			638,96			229,24	
12,00	0,72	16,5	622,98	15,98	4,88	253,35	24,11
			642,34			229,70	
13,00	0,35	16,6	626,76	15,59	4,84	251,27	21,57
			645,73			227,84	
14,00	0,32	16,9	638,08	7,65	4,57	237,25	9,41
			645,73			215,26	
15,00	0,17	17,3	653,19	-7,45	4,24	220,12	4,86
		Total de O2 consumido (mg)		299,83	Total de CO2 produzido (mg)		380,24

BVS2_T							
t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	64,69	21,0	792,88		0,32	16,61	
1,00	45,75	20,6	777,78	15,10	0,81	42,05	25,44
			781,27			40,08	
2,00	32,22	20,7	781,56	-0,29	0,74	38,42	-1,66
			784,66			36,82	
3,00	30,70	20,7	781,56	3,10	0,75	38,94	2,12
			784,66			37,29	
4,00	29,17	20,7	781,56	3,10	0,75	38,94	1,65
			784,66			37,29	
5,00	24,83	20,5	774,01	10,65	0,84	43,61	6,32
			777,88			41,48	
6,00	20,25	20,3	766,45	11,42	1,05	54,51	13,03
			771,10			51,26	
7,00	16,92	19,9	751,35	19,75	1,28	66,45	15,19
			757,55			61,98	
8,00	14,46	19,4	732,47	25,07	1,66	86,18	24,20
			740,61			79,68	
9,00	11,26	19,0	717,37	23,24	2,09	108,50	28,82
			727,05			99,72	
10,00	9,77	18,2	687,17	39,89	2,83	146,92	47,20
			699,95			134,19	
11,00	8,28	17,4	656,96	42,98	3,57	185,34	51,14
			672,84			168,67	
12,00	4,59	16,7	630,53	42,31	4,12	213,89	45,22
			649,12			194,29	
13,00	1,74	15,5	585,22	63,90	4,97	258,02	63,72
			608,46			233,90	
14,00	1,29	15,3	577,67	30,79	5,21	270,48	36,58
			601,68			245,08	
15,00	0,83	15,1	570,12	31,56	5,44	282,42	37,34
			594,91			255,79	
16,00	1,13	15,5	585,22	9,68	5,23	271,52	15,72
			608,46			246,01	
17,00	1,07	16,0	604,10	4,36	4,92	255,42	9,41
			625,40			231,57	
18,00	0,97	16,4	619,20	6,20	4,51	234,14	2,57
			638,96			212,46	
19,00	0,17	16,8	634,31	4,65	4,36	226,35	13,89
			652,51			205,48	
20,00	0,18	17	641,86	10,65	4,05	210,26	4,78
			659,29			191,03	
21,00	0,12	17,5	660,74	-1,45	3,73	193,64	2,61
			676,23			176,12	
22,00	0,1	17,6	664,51	11,72	3,58	185,86	9,73
			Total de O2 consumido (mg)	408,37	Total de CO2 produzido (mg)		455,03

BVSR_E							
t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	31,23	21,5	811,76		0,44	22,84	
1,00	21,27	21,1	796,66	15,10	0,74	38,42	15,57
			798,21			36,82	
2,00	18,01	21,1	796,66	1,55	0,71	36,86	0,04
			798,21			35,42	
3,00	14,97	21,1	796,66	1,55	0,72	37,38	1,96
			798,21			35,89	
4,00	13,23	20,9	789,11	9,10	0,75	38,94	3,05
			791,43			37,29	
5,00	10,70	20,9	789,11	2,32	0,89	46,20	8,92
			791,43			43,81	
6,00	9,77	20,7	781,56	9,87	1,17	60,74	16,93
			784,66			56,85	
7,00	9,44	20,0	755,13	29,53	1,83	95,00	38,15
			760,94			87,60	
8,00	6,65	18,9	713,60	47,34	2,71	140,69	53,09
			723,66			128,60	
9,00	4,26	16,7	630,53	93,13	4,42	229,46	100,86
			649,12			208,27	
10,00	1,69	15,8	596,55	52,57	5,09	264,25	55,98
			618,63			239,49	
11,00	1,71	16,1	607,88	10,75	5,02	260,61	21,13
			628,79			236,23	
12,00	0,80	16,1	607,88	20,91	5,23	271,52	35,29
			628,79			246,01	
13,00	0,40	16,0	604,10	24,69	5,41	280,86	34,85
			625,40			254,40	
14,00	0,21	16,0	604,10	21,30	5,35	277,75	23,35
			625,40			251,60	
15,00	0,32	16,0	604,10	21,30	4,97	258,02	6,42
Total de O2 consumido (mg)				361,58	Total de CO2 produzido (mg)		415,58

BVS2_E							
t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	36,03	21,0	792,88		0,34	17,65	
1,00	23,29	20,7	781,56	11,33	1,01	52,43	34,78
			784,66			49,40	
2,00	14,55	20,6	777,78	6,87	0,92	47,76	-1,64
			781,27			45,21	
3,00	12,92	20,6	777,78	3,49	0,89	46,20	1,00
			781,27			43,81	
4,00	11,48	20,7	781,56	-0,29	0,86	44,65	0,84
			784,66			42,41	
5,00	10,51	20,4	770,23	14,43	0,95	49,32	6,91
			774,49			46,60	
6,00	9,45	19,9	749,46	25,03	1,06	55,03	8,43
			755,85			51,73	
7,00	8,40	19,3	728,70	27,16	1,17	60,74	9,01
			737,22			56,85	
8,00	10,23	18,8	709,82	27,40	1,35	70,09	13,23
			720,28			65,24	
9,00	8,75	19,4	732,47	-12,20	1,58	82,03	16,79
			740,61			75,96	
10,00	7,46	19,4	732,47	8,13	1,47	76,32	0,36
			740,61			70,83	
11,00	6,41	19,2	724,92	15,68	1,68	87,22	16,39
			733,83			80,61	
12,00	5,66	19,3	728,70	5,13	1,85	96,04	15,43
			737,22			88,53	
13,00	6,77	18,9	713,60	23,62	2,19	113,69	25,16
			723,66			104,38	
14,00	3,42	18,8	709,82	13,84	2,27	117,85	13,47
			720,28			108,10	
15,00	3,33	18,5	698,49	21,78	2,56	132,90	24,80
			710,11			121,61	
16,00	2,81	18,5	698,49	11,62	2,73	141,73	20,11
			710,11			129,53	
17,00	1,63	18,1	683,39	26,72	3,06	158,86	29,33
			696,56			144,91	
18,00	1,38	17,6	664,51	32,05	3,52	182,74	37,83
			679,62			166,34	
19,00	1,07	17,5	660,74	18,88	3,59	186,38	20,03
			676,23			169,60	
20,00	0,8	17,2	649,41	26,82	4,03	209,22	39,62
			666,06			190,10	
21,00	0,33	16,9	638,08	27,98	4,31	223,75	33,65
			655,90			203,15	
22,00	0,43	17,1	645,63	10,26	4,15	215,45	12,30
			662,67			195,69	
23,00	0,19	17,3	653,19	9,49	3,93	204,03	8,33
Total de O2 consumido (mg)				345,73	Total de CO2 produzido (mg)		386,17

BVSX_X							
t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	26,60	21,5	811,76		0,44	22,84	
1,00	20,80	21,1	796,66	15,10	0,73	37,90	15,06
			798,21			36,35	
2,00	14,64	21,1	796,66	1,55	0,69	35,82	-0,53
			798,21			34,49	
3,00	13,99	21,1	796,66	1,55	0,69	35,82	1,33
			798,21			34,49	
4,00	11,18	21,0	792,88	5,32	0,68	35,30	0,81
			794,82			34,02	
5,00	9,66	21,1	796,66	-1,84	0,66	34,26	0,24
			798,21			33,09	
6,00	8,38	21,2	800,44	-2,23	0,72	37,38	4,29
			801,60			35,89	
7,00	7,89	21,1	796,66	4,94	0,76	39,46	3,57
			798,21			37,75	
8,00	7,35	21,0	792,88	5,32	0,81	42,05	4,30
			794,82			40,08	
9,00	7,17	21,7	819,31	-24,49	0,92	47,76	7,68
			818,54			45,21	
10,00	6,63	21,4	807,99	10,55	1,12	58,14	12,94
			808,37			54,52	
11,00	5,28	20,2	762,68	45,69	1,28	66,45	11,93
			767,71			61,98	
12,00	4,58	20,0	755,13	12,59	1,53	79,43	17,45
			760,94			73,63	
13,00	3,80	19,80	747,58	13,36	1,90	98,64	25,01
			754,16			90,86	
14,00	3,50	19,4	732,47	21,69	2,16	112,14	21,27
			740,61			102,98	
15,00	3,04	19,2	724,92	15,68	2,32	120,44	17,47
			733,83			110,43	
16,00	1,92	19,1	721,15	12,68	2,33	120,96	10,53
			730,44			110,90	
17,00	2,12	18,9	713,60	16,85	2,44	126,67	15,77
			723,66			116,02	
18,00	1,60	18,6	702,27	21,40	2,55	132,38	16,36
			713,50			121,15	
19,00	1,26	18,6	702,27	11,23	2,66	138,09	16,95
			713,50			126,27	
20,00	1,15	18,7	706,04	7,46	2,73	141,73	15,46
			716,89			129,53	
21,00	0,96	18,8	709,82	7,07	2,82	146,40	16,87
			720,28			133,73	
22,00	0,87	19,0	717,37	2,90	2,59	134,46	0,73
			727,05			123,01	
23,00	0,81	19,1	721,15	5,91	2,50	129,79	6,78
			730,44			118,82	
24,00	0,57	19,4	732,47	-2,03	2,29	118,89	0,07

			740,61			109,03	
25,00	0,49	19,5	736,25	4,36	2,13	110,58	1,54
			744,00			101,58	
26,00	0,45	19,60	740,03	3,97	2,10	109,02	7,44
			747,38			100,18	
27,00	0,50	19,7	743,80	3,58	1,95	101,23	1,05
		Total de O2 consumido (mg)		132,74	Total de CO2 produzido (mg)		148,29

BVSR2_X

t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	58,25	20,9	789,11		0,41	21,29	
1,00	31,51	20,6	777,78	11,33	1,15	59,70	38,42
			781,27			55,92	
2,00	28,33	20,5	774,01	7,26	1,16	60,22	4,30
			777,88			56,39	
3,00	21,09	20,3	766,45	11,42	1,25	64,89	8,51
			771,10			60,58	
4,00	18,38	20,0	755,13	15,97	1,47	76,32	15,73
			760,94			70,83	
5,00	13,72	19,3	728,70	32,24	1,86	96,56	25,73
			737,22			89,00	
6,00	13,38	18,6	702,27	34,95	2,19	113,69	24,69
			713,50			104,38	
7,00	9,97	18,4	694,72	18,78	2,36	122,52	18,14
			706,72			112,30	
8,00	6,68	18,2	687,17	19,56	2,55	132,38	20,09
			699,95			121,15	
9,00	3,99	17,4	656,96	42,98	3,03	157,30	36,15
			672,84			143,51	
10,00	2,92	17,2	649,41	23,43	3,22	167,17	23,66
			666,06			152,36	
11,00	2,27	17,4	656,96	9,10	3,18	165,09	12,73
			672,84			150,50	
12,00	2,14	17,5	660,74	12,10	3,00	155,75	5,25
			676,23			142,11	
13,00	1,94	17,7	668,29	7,94	2,83	146,92	4,81
			683,00			134,19	
14,00	1,82	18,0	679,62	3,39	2,63	136,54	2,34
			693,17			124,87	
15,00	1,92	18,1	683,39	9,78	2,53	131,35	6,47
			696,56			120,22	
16,00	1,41	18,3	690,94	5,62	2,42	125,63	5,42
			703,33			115,09	
17,00	1,35	18,6	700,38	2,95	2,26	117,33	2,24
			711,81			107,64	
18,00	1,29	18,8	709,82	1,99	2,10	109,02	1,38
			720,28			100,18	
19,00	1,49	19,1	721,15	-0,87	1,95	101,23	1,05
			730,44			93,19	
20,00	1,22	19,25	726,81	3,63	1,80	93,45	0,25

			735,52			86,21	
21,00	0,95	19,4	732,47	3,05	1,64	85,14	-1,06
			740,61			78,75	
22,00	0,98	19,7	743,80	-3,19	1,51	78,39	-0,36
			750,77			72,69	
23,00	0,68	19,9	751,35	-0,58	1,40	72,68	-0,01
			757,55			67,57	
24,00	0,68	19,9	751,35	6,20	1,33	69,05	1,48
			757,55			64,31	
25,00	0,63	19,9	751,35	6,20	1,23	63,86	-0,45
			757,55			59,65	
26,00	0,68	19,9	751,35	6,20	1,12	58,14	-1,50
			757,55			54,52	
27,00	0,5	20,1	758,90	-1,35	0,99	51,40	-3,13
			764,33			48,47	
28,00	0,4	20,4	770,23	-5,91	0,90	46,72	-1,74
Total de O2 consumido (mg)			284,58	Total de CO2 produzido (mg)		250,58	

BVSR_BTEx

t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	71,30	21,5	811,76		0,46	23,88	
1,00	48,89	21,1	796,66	15,10	0,91	47,24	23,36
			798,21			44,85	
2,00	39,64	21,1	796,66	1,55	0,97	50,36	5,51
			798,21			47,64	
3,00	32,52	21,1	796,66	1,55	1,36	70,60	22,96
			798,21			65,81	
4,00	39,31	21,0	792,88	5,32	1,34	69,57	3,75
			794,82			64,88	
5,00	33,32	21,1	796,66	-1,84	1,67	86,70	21,82
			798,21			80,25	
6,00	27,32	21,2	800,44	-2,23	2,00	103,83	23,58
			801,60			95,63	
7,00	15,82	21,1	796,66	4,94	2,60	134,98	39,35
			798,21			123,58	
8,00	12,02	21,0	792,88	5,32	3,36	174,43	50,85
			794,82			158,99	
9,00	10,15	21,7	819,31	-24,49	4,16	215,97	56,97
			818,54			196,26	
10,00	2,62	21,4	807,99	10,55	5,00	259,58	63,31
			808,37			235,40	
11,00	1,16	20,2	762,68	45,69	5,19	269,44	34,04
			767,71			244,25	
12,00	0,26	20,0	755,13	12,59	5,23	271,52	27,26
			760,94			246,12	
13,00	0,22	19,80	747,58	13,36	4,73	245,56	-0,56
			754,16			222,82	
14,00	0,18	19,4	732,47	21,69	4,73	245,56	22,74
Total de O2 consumido (mg)			109,11	Total de CO2 produzido (mg)		394,95	

BVXT_B

t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	118,50	21,0	826,95		0,32	17,33	
1,00	95,62	20,3	799,39	27,57	1,48	80,14	62,81
			802,10			73,96	
2,00	54,78	19,0	748,19	53,90	2,62	141,86	67,90
			755,94			129,61	
3,00	5,34	10,7	421,35	334,59	9,87	534,42	404,80
			461,24			483,56	
4,00	0,45	11,1	437,10	24,14	9,77	529,00	45,44
			475,44			478,68	
5,00	0,35	12,0	472,54	2,90	9,13	494,35	15,67
			507,40			447,44	
6,00	0,24	12,6	496,17	11,23	8,50	460,24	12,80
			528,70			416,68	
7,00	0,24	13,1	515,86	12,84	7,70	416,92	0,24
			Total de O ₂ consumido (mg)	467,16		Total de CO ₂ produzido (mg)	609,66

BVXT_T

t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	71,00	21,0	826,95		0,32	17,33	
1,00	45,81	20,6	811,20	15,75	1,63	88,26	70,93
			812,75			81,28	
2,00	48,99	19,5	767,88	44,87	2,35	127,24	45,96
			773,69			116,43	
3,00	25,96	18,1	712,75	60,94	3,69	199,80	83,36
			723,98			181,85	
4,00	2,20	12,1	476,48	247,50	8,61	466,19	284,34
			510,95			422,05	
5,00	0,36	11,9	468,61	42,34	8,88	480,81	58,76
			503,85			435,23	
6,00	0,34	12,1	476,48	27,37	8,62	466,73	31,50
			510,95			422,54	
7,00	0,33	12,9	507,98	2,96	8,24	446,16	23,62
			Total de O ₂ consumido (mg)	441,73		Total de CO ₂ produzido (mg)	598,49

BVXT_E

t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	42,47	21,0	826,95		0,32	17,33	
1,00	19,62	20,6	811,20	15,75	1,56	84,47	67,14
			812,75			77,86	
2,00	19,76	19,3	760,01	52,74	2,59	140,24	62,37
			766,59			128,15	
3,00	6,06	14,2	559,18	207,41	6,88	372,52	244,37
			585,51			337,59	
4,00	0,85	13,0	511,92	73,59	7,88	426,67	89,08
			542,90			386,41	
5,00	0,41	13,1	515,86	27,04	7,92	428,83	42,42
			546,45			388,36	
6,00	0,38	13,3	523,74	22,72	7,62	412,59	24,23
			553,55			373,72	
7,00	0,27	13,7	539,49	14,07	7,58	410,42	36,71
			Total de O2 consumido (mg)	413,33		Total de CO2 produzido (mg)	566,32

BVXT_X

t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	41,00	21,0	826,95		0,32	17,33	
1,00	15,87	20,6	811,20	15,75	1,63	88,26	70,93
			812,75			81,28	
2,00	13,80	19,6	771,82	40,93	2,37	128,32	47,04
			777,24			117,41	
3,00	11,16	18,6	732,44	44,80	2,50	135,36	17,96
			741,74			123,76	
4,00	7,00	17,6	693,06	48,67	4,04	218,75	94,99
			706,23			198,94	
5,00	3,93	15,8	622,18	84,05	5,44	294,55	95,61
			642,32			267,29	
6,00	2,35	14,7	578,87	63,45	6,19	335,16	67,87
			603,26			303,90	
7,00	1,25	14,2	559,18	44,09	6,59	356,82	52,92
			585,51			323,43	
8,00	0,88	14,1	555,24	30,27	6,63	358,98	35,55
			581,96			325,38	
9,00	0,56	14,2	559,18	22,78	6,54	354,11	28,73
			585,51			320,99	
10,00	0,61	14,6	574,93	10,58	6,46	349,78	28,79
			599,71			317,09	
11,00	0,53	14,8	582,80	16,91	6,27	339,49	22,41
			606,81			307,81	
12,00	0,46	15,2	598,55	8,26	6,04	327,04	19,23
			621,02			296,58	
13,00	0,44	15,60	614,31	6,71	5,83	315,67	19,09
			635,22			286,33	

14,00	0,33	15,9	626,12	9,10	5,73	310,25	23,93
			Total de O2 consumido (mg)	446,36	Total de CO2 produzido (mg)		625,04

BVXT_BTEoX

t (dias)	Cgas (mg L ⁻¹)	O ₂ (%)	Massa O ₂ na Coluna (mg)	Massa O ₂ Consumida (mg)	CO ₂ (%)	Massa CO ₂ na Coluna (mg)	Massa CO ₂ Produzida (mg)
0,00	73,48	21,0	826,95		0,34	18,41	
1,00	40,75	20,2	795,45	31,50	1,90	102,88	84,47
			798,55			94,57	
2,00	37,20	19,4	763,94	34,60	2,54	137,53	42,96
			770,14			125,81	
3,00	16,89	12,4	488,29	281,85	8,20	443,99	318,18
			521,60			402,14	
4,00	5,12	11,8	464,67	56,93	8,97	485,69	83,55
			500,30			439,73	
5,00	4,60	11,8	464,67	35,63	9,03	488,93	49,20
			500,30			442,66	
6,00	4,08	11,7	460,73	39,57	9,08	491,64	48,98
			496,75			445,10	
7,00	1,54	12,4	488,29	8,45	8,48	459,15	14,05
			521,60			415,81	
8,00	1,18	13,1	515,86	5,74	7,83	423,96	8,15
			546,45			384,08	
9,00	2,25	13,9	547,36	-0,91	7,22	390,93	6,86
			574,86			354,30	
10,00	1,16	14,5	570,99	3,87	6,68	361,69	7,40
			596,16			327,93	
11,00	1,40	15,0	590,68	5,48	6,21	336,24	8,31
			613,91			304,99	
12,00	0,11	15,6	614,31	-0,39	5,71	309,17	4,18
			635,22			280,58	
13,00	0,13	16,70	657,62	-22,40	4,71	255,03	-25,55
			674,27			231,76	
14,00	0,13	16,7	657,62	16,65	4,71	255,03	23,27
			Total de O2 consumido (mg)	496,57	Total de CO2 produzido (mg)		674,01